Universidade Estadual de Londrina

ANDERSON WILLIAM SIMÕES BORGES

ESTUDO E PROPOSTA PARA AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Londrina
2011

ANDERSON WILLIAM SIMÕES BORGES

ESTUDO E PROPOSTA PARA AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Roberto Covacic

Londrina
2011

Catalogação elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central da Universidade Estadual de Londrina

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

B732e Borges, Anderson William Simões.
Estudo e proposta para automação de sistemas de abastecimento de água / Anderson William Simões Borges. – Londrina, 2011. 71 f.: il.

Orientador: Márcio Roberto Covacic.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2011.
Inclui bibliografia.

1. Abastecimento de água – Teses. 2. Abastecimento de água nas cidades – Análise energética – Teses. 3. Água – Uso – Teses. 4. Saneamento – Automação – Teses. I. Covacic, Márcio Roberto. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU 628.16

ANDERSON WILLIAM SIMÕES BORGES

ESTUDO E PROPOSTA PARA AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

BANCA EXAMINADORA

____

Prof. Dr. Márcio Roberto Covacic
Orientador/Presidente
UEL – Londrina –PR

____

Prof. Dr. Leonimer Flávio de Melo
UEL – Londrina –PR

____

Prof. Dr. Fernando Fernandes
UEL – Londrina –PR

Londrina, 03 de Novembro de 2011

Dedico este trabalho a minha esposa Vanessa e filha Giovanna, duas mulheres maravilhosas que Deus colocou em minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Agradeço ao professor Dr. Márcio Roberto Covacic, pela orientação e dedicação concedidas a realização deste trabalho e, principalmente, pela confiança e amizade.

Aos professores Dr. Leonimer Flávio de Melo e Dr. Fernando Fernandes, pelas contribuições e direcionamento que ajudaram a enriquecer o trabalho.

Aos professores do programa de pós-graduação: Alexandre, Treviso, Silvia, Taufik, Pizolato pelos ensinamentos.

A Sanepar por intermédio do Sr. Gil Gameiro, responsável pelo CCO de Londrina, pelos dados fornecidos.

Aos colegas da pós-graduação: Emerson, Evandro, Cleber, Fábio, Ednei, Wagner, Nelson e Osni com quem tive o prazer de conviver durante este período tão importante da minha vida.

Agradeço a minha amada esposa Vanessa, pela compreensão, amor e carinho dedicados nesta etapa da minha vida.

À minha mãe Niuza e meu pai Eveton, por todo o carinho e apoio, pessoas que tenho uma profunda admiração e gratidão.

Agradeço a CNPq, pelo apoio financeiro; e a UEL pelo ensinogratuito e de qualidade.

“Se não puder se destacar pelo talento, vença pelo esforço”.

Dave Weinbaum

BORGES, Anderson William Simões. **Estudo e proposta para automação de sistemas de abastecimento de água**. 2009-2011. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2011.

RESUMO

Muitos são os motivos para a realização de pesquisas que envolvam o setor de saneamento básico no Brasil. Entre estes motivos estão algumas características muito peculiares relacionadas a este setor, características que vão desde a sua concepção e a sua forma de organização até sua operação. Este trabalho oferece uma visão prática sobre a aplicação de tecnologias de automação a sistemas de abastecimento de água e tem como objetivo expor um conjunto de soluções viáveis voltadas à automação de sistemas de abastecimento de águavisando a eficiência energética e que possam ser aplicados até em municípios que administram o próprio abastecimento de água. São apresentados neste trabalho, testes da aplicação de métodos de otimização ao problema de acionamento (horário ótimo) dos conjuntos motor-bomba do sistema principal de abastecimento de água comparados com a operação manual. Numa primeira análise de desempenho fez-se uso de programação linear (PL) e não linear (PNL), onde foi considerado que as variáveis de decisão pudessem assumir valores fracionários. Por fim, são descritas algumas destas soluções, aqui denominadas referenciais de análise, com o objetivo de delinear um modelo de automação para sistemas de abastecimento de água que possa oferecer subsídios para o desenvolvimento destes sistemas em regiões que estão a um nível muito baixo de automação com foco em eficiência energética.

Palavras chave: Sistemas SCADA. Tecnologias de automação. Supervisão de sistemas de abastecimento de água. Programação linear (PL). Não linear (PNL). Eficiência energética.

BORGES, Anderson William Simões. **Study andproposal for automation systems water supply**. 2009-2011. 71 f. Dissertation (Maste's in Electrical Engineering) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2010.

ABSTRACT

There are many reasons for conducting research involving the basic sanitation sector in Brazil. Among these reasons are some very peculiar features related to this industry, features ranging from its design and form of organization to its operation. This paper offers a practical view on the application of automation technologies in water supply systems and aims to expose a set of feasible solutions focused on automation of water supply and improving efficiency that can be applied even in municipalities that manage their own water supply. They are presented here, testing the application of optimization methods to the problem drive (good time) sets the motor-pump system main water supply compared with manual operation. In a first performance analysis was made using linear programming (LP) and nonlinear (PNL), where it was considered that the decision variables could take fractional values. Finally, we describe some of these solutions, here called referential analysis, in order to outline a model of automation systems for water supply that can provide insight to the development of these systems in regions that are at a very low level of automation focusing on energy efficiency.

Keywords: SCADA systems. Automation technology. Supervision of water supply systems. Linear programming (LP). Nonlinear (NLP) and energy efficiency.

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

3G	Terceira geração de padrões e tecnologias de telefonia móvel
A	Amperagem
AG	Algoritmo Genético
AM	Amplitude modulada
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ATM	*AsynchonousTransferMode* – Modo de transferência assíncrono
CCM	Centro de Controle de Motores
CCO	Centro de Controle Operacional
CLP	Controlador Lógico Programável
CV	Cavalo Vapor
DDC	*Digital DirectControl* – Controle digital direto
EEA	Estação Elevatória de Água
EEAB	Estação Elevatória de Água Bruta
EPANET	Aplicativo Computacional (modelo de simulação)
ERP	Sistema Integrado de Gestão Empresarial
ETA	Estação de Tratamento de Água
FM	Frequência Modulada
FP	Fora de Ponta
GRG2	Código de OtimizaçãoNào linear
KVA	kilo Volt Amper
KV	Kilo Volt
KW	Kilo Watt
KWh	Kilo Watt Hora
mca	Metro de Coluna d'Água
PC	Posto de Cloração
pH	Potencial Hidrogenionico
PID	Controle Proporcional, Integral e Derivativo
PL	Programação Linear
PLI	Programação linear Inteira
PNL	Programação Não Linear
PQ	Programação Quadrática
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

rpm	Rotação Por Minuto
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SANEAR	Eficiência Energética no Saneamento Ambiental
SANEPAR	Companhia de Saneamento Básico do Paraná
SCADA	Supervisório de Controle de Aquisição de Dados
TAG	Sigla referente a codificação
V	Tensão Elétrica (Volts)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA DO ESTUDO E PESQUISA

Dentre os recursos naturais, a água e o ar são os mais importantes por serem vitais para a humanidade. Durante anos, constituiu-se um cenário em que o recurso água foi utilizado despreocupadamente, por ser percebido como renovável e abundante e portanto, entendido como infindável.

Com o crescimento demográfico, os agrupamentos urbanos tornaram-se cada vez mais densos e com atividades que exigiam cada dia, uma maior quantidade de água. Da crescente consciência sobre o caráter esgotável dos recursos hídricos infere-se a necessidade de gestão eficiente e efetiva destes bens que se já era evidente torna-se, nos dias atuais, imperativa.

Foram criados os órgãos de controle ambiental como, por exemplo, IAP (Instituto Ambiental do Paraná), agências e SINAS para normatizar o uso e prevenir níveis de poluição que viesse a comprometer a sobrevivência do ser humano em gerações futuras.

Neste contexto, a automação dos procedimentos de coleta de dados sobre o uso de recursos de água pode contribuir significativamente para seu melhor aproveitamento, pois possibilita seu acompanhamento e controle. Além disso, a racionalização do uso desses recursos permite também a gestão de sua distribuição e um controle de perdas mais efetivo.

Silveira (1998, p. 23) descreve a automação como sendo um conceito e um conjunto de técnicas por meio das quais constroem-se sistemas ativos capazes de atuar com uma eficiência ótima pelo uso de informações recebidas do meio sobre o qual atuam. Já Pereira (1995 apud SOUZA, 2006, p.28) concebe a automação como sendo “a ciência que estuda e aplica metodologias, ferramentas e equipamentos, objetivando definir quando e como converter o controle de um processo manual para automático”.

Infelizmente, como afirmado por Trojanet al. (2000, p. 2), ao abordarem as condições de uso da água, “a automação em saneamento ainda é pontual. Isso é reflexo da falta de recursos das companhias de saneamento, majoritariamente estatais [...]”. Associado a essa carência de recursos, outro entrave enfrentado para a adoção de automação nesse segmento incide sobre o aspecto

geográfico, que impõe sérios limites ao uso de meios de comunicação, como recursos de obtenção de dados sobre o funcionamento do sistema de abastecimento de água. Geralmente as unidades de monitoração e controle remotos que compõem o sistema estão instaladas em locais que não possuem infraestrutura de telecomunicações ou energia elétrica, levando ao aproveitamento de estruturas alternativas como postes e torres improvisadas.

A influência da prestação de um bom serviço de saneamento básico tem impacto direto na área da saúde e do meio ambiente, e, é claro, sobre o desenvolvimento e crescimento econômico do país.

De acordo com Bao e Mays (1990) dita que a confiabilidade é uma medida da performance (desempenho) do sistema. A performance hidráulica depende das condições ideais que viabilizam fatores como: interação entre o sistema de transporte, conservação da capacidade de armazenamento, conservação da capacidade de distribuição, sistema de segurança como funcionamento adequado das válvulas reguladoras e bombas.

Dentro do conjunto de condições urbanas essenciais para a preservação da saúde pública que constitui o termo saneamento básico, que envolve também o condicionamento e destinação do esgoto e o controle da poluição ambiental, as ações de abastecimento de água constituem uma vertente de estudo específica.

O SNIS – Sistema Nacional de Informação Sobre Saneamento – (2002) aponta que, no Brasil, de 5.561 municípios amostrados, apenas 75,3% são servidos por sistemas de abastecimento de água com a prestação dos serviços de saneamento centralizada em 25 concessionarias estaduais e sociedades de economia mista, o restante dos municípios é atendido por empresas municipais autônomas. Cerca de 94,3% da população é abastecida de água. A taxa de crescimento de novas ligações e de esgoto em 2002 foi de até 15,9%, respectivamente. O consumo per capita de água no país varia entre 67 e 192 litros/habitantes/dia.

Os sistemas de abastecimento de água tem por objetivo a prestação de um serviço público fundamental para a saúde e o bem estar das populações, que consiste em satisfazer as necessidades das comunidades em termos de fornecimento de água. No entanto, o setor de saneamento no Brasil, durante muitos anos, teve uma baixa taxa de investimentos devido a problemas macroeconômicos

que implicaram decisões de políticas governamentais que pouco privilegiaram este serviço.

Por esta razão, hoje, esse setor sofre as consequências desse baixo investimento, o que se reflete no pequeno desenvolvimento tecnológico dos sistemas de automação, cujo papel é fundamental na gestão dos recursos de água.

Nesse contexto de carência de investimentos é de suma importância a propagação de conhecimentos tecnológicos e de boas práticas na gestão dos recursos de água, como as definidas por Baptista (1998, p. 8), que podem ser resumidas na disponibilidade, por parte da empresa de abastecimento de água de recursos humanos, tecnológicos e financeiros suficientes e infraestrutura de captação, elevação, tratamento, adução, armazenamento, distribuição e qualidade.

Um estudo sobre os resultados de implantação de uma modelo de otimização realizado por Coulbeck e Orr (1990),numa cidade da Inglaterra buscava redução de custos de energia elétrica no bombeamento, utilizando um modelo de previsão de demanda de consumo de água e um modelo simulador. Concluíram, a partir dos resultados, que a implantação trouxe benefícios incluindo: um custo de bombeamento mínimo, um sistema de operação automatizado, instantâneo e com introdução de um sistema deprevisão.

1.2 OBJETIVOS

Visando a análise de tecnologias para o controle, a supervisão e o gerenciamento dos sistemas de abastecimento de água e a sua difusão, optou-se por um estudo para automação de um sistema de abastecimento de água e um capítulo com estudo sobre eficiência energética.

Por meio deste estudo pretende-se apresentar desde um conjunto de soluções simples de automação de sistemas de abastecimento de água que demandam pouco investimento, até soluções mais elaboradas para utilização em sistemas de maior porte, cuja necessidade de investimento é maior.

Objetiva-se com a descrição dessas soluções, aqui denominadas referenciais de análise, estabelecer uma proposta de automação para sistemas de abastecimento de água com vistas à eficiência energética, utilizando a programação linear para o controle do bombeamento de água a partir de uma estação elevatória

minimizando o consumo em horários de ponta da companhia de energia elétrica do Paraná (COPEL).

Assim fornecer subsídios para sua implantação em regiões em que os sistemas não foram ainda objeto de automatização ou redução do consumo de energia elétrica.

1.3 Divisão do Trabalho

Com intenção de delinear uma proposta de automação para sistemas de abastecimento de água, o trabalho está estruturado em torno dos aspectos indicados a seguir:

Primeiramente, estabelece-se a conceituação básica, por meio da descrição dos sistemas de abastecimento de água e da estrutura que constitui estes sistemas. Esta conceituação é seguida pela descrição básica do que são sistemas automatizados, em especial os de arquitetura distribuída, que constituem o enfoque principal neste trabalho.

Estabelecidas as bases conceituais, define-se a metodologia de obtenção, análise e interpretação dos dados que subsidiaram a proposta de eficiência energética apresentado.

O sistema de abastecimento de água consome entre torno de três por cento da energia do mundo, utilizando-a no bombeamento e tratamento de água para residências urbanas e industriais (USEPA, 1998).

A Eletrobrás preocupada com os custos de eletricidade no setor desaneamento básico está investindo na redução do consumo de energia emparceria com a Secretaria de Saneamento Ambiental (SNSA) do Ministério das Cidades, EficiênciaEnergética no Saneamento Ambiental (PROCEL – SANEAR).

Espera reduzir em 10% o gasto de energia no setor, uma vez que o consumo de energia é de 8.890 Gwh/ano (PROCEL, 2003), querepresenta 3,3% do consumo global de energia elétrica no Brasil.

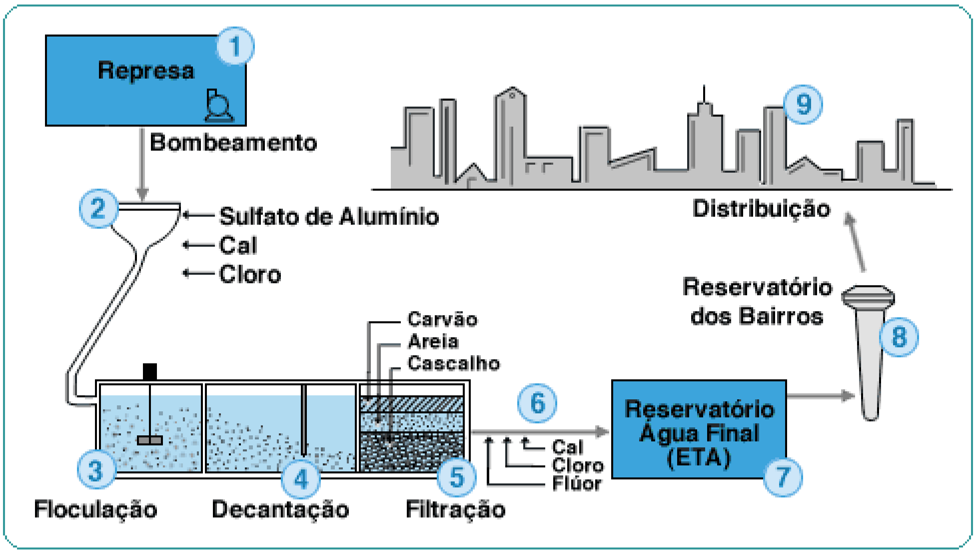
Por conseguinte, estabelecem-se as considerações finaise proposições para aprofundamento do tema.

2 ESTUDO DOS SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

2.1 Análise dos Sistemas de Abastecimento de Água

A infraestrutura de um sistema abastecimento de água é composta por diversas estações, desde a origem da água – que constitui a estação de captação – até o local de monitoração do macro consumo. São elas, na totalidade dos casos, as estações de captação, de elevação, de tratamento, de adução hídrica, de armazenamento e de distribuição pública. Um modelo simplificado desde infraestrutura pode ser visto na Fig. 1:

Figura 1 – Modelo de infraestrutura do abastecimento de água



Para Trojan et al. (2000), o sistema de captação tem por função recolher, em qualquer meio superficial ou subterrâneo, água em quantidade suficiente e com características físicas, químicas e bacteriológicas minimamente aceitáveis.

O sistema de elevação tem por função transmitir energia à água, de modo a que ela passe não só a circular a uma pressão conveniente, como também a ter a possibilidade de vencer desníveis topográficos e a garantir as pressões necessárias nos pontos de consumo.

O sistema de tratamento tem por função conferir à água características físicas, químicas e bacteriológicas compatíveis com as exigências da legislação atual.

O sistema de adução tem por função transportar a água para as zonas de consumo por vezes muito afastadas do local de captação.

O sistema de armazenamento tem por função acumular a água por períodos variáveis em locais especialmente destinados a isso, seja para regularização dos mananciais, seja para garantir reservas de incêndio e de avaria.

O sistema de distribuição pública tem por função fazer a distribuição na região a abastecer, garantindo que diversos pontos de consumo recebam a água com pressões convenientes.

O ciclo de vida dos sistemas de abastecimento de água é composto por diversas fases, algumas das quais constituem aquilo que pode ser designado por vida útil do sistema. Nesse sentido, o início do ciclo de vida corresponde ao planejamento do sistema, fase em que ele é imaginado em termos gerais, tendo em conta o contexto físico em que ele irá se inserir e os objetivos que se pretende alcançar.

Melo Baptista (1995) afirma que após o planejamento, segue-se a fase de elaboração do projeto, em que se detalha e especifica o sistema idealizado. Ele é constituído por diversas etapas, compreendendo, de acordo com a legislação atual, o programa preliminar, o programa base, o estudo prévio, o anteprojeto e o projeto de execução. Aprovado o projeto, efetiva-se então a construção do sistema, a que se segue a sua exploração, compreendendo sua operação e manutenção, permitindo colocá-lo ao serviço dos consumidores, e com uma duração prevista tão longa quanto possível, da ordem das muitas décadas.

Se não houver nenhuma intervenção, o envelhecimento natural e inevitável do sistema e/ou eventualmente o envelhecimento acelerado resultante de planejamento, projeto, construção ou exploração inadequados tenderá gradualmente a dificultar e mesmo a impossibilitar o cumprimento dos seus objetivos de uma forma técnico-economicamente aceitável, conduzindo ao fim do ciclo de vida do sistema.

É, no entanto, possível recorrer à reabilitação de toda a infraestrutura, com o objetivo de melhorar o seu desempenho por meio da alteração da sua condição física e/ou da sua especificação técnica. Essa fase corresponde, na prática, ao retorno as fases de projeto e construção do sistema, permitindo mantê-lo

em exploração por um período de tempo significativamente maior. Este processo envolve a constante atualização tecnológica dos sistemas de automação e considerações sobre modificações nas tecnologias utilizadas na gestão dos cada vez mais preciosos e escassos recursos de água.

2.2 A AUTOMAÇÃO E A GESTÃO DO USO DA ÁGUA

Como exposto por Carmo e Távora (2003), as empresas de saneamento têm, cada vez mais necessidade de melhorar seus resultados operacionais devido às novas exigências impostas pela sociedade civil e governamental. Neste contexto, a automação surge como uma ferramenta poderosa na melhoria da gestão do saneamento pois, além de aumentar a qualidade do processo, possibilita a coleta sistemática, integrada e hierarquizada dos dados necessários.

Nesses termos, a automação dos sistemas de abastecimento de água consiste, basicamente, em coletar, concentrar e analisar as informações do processo com o uso da tecnologia de informação. Baseados nos resultados obtidos, os sistemas de automação agem de forma autônoma monitorada sobre os estados e as grandezas do processo para obtenção dos resultados desejados.

Mario Filho (2001) explica que o conceito de automação em sistemas de abastecimento de água assemelha-se muito ao que acontece no setor elétrico. Da mesma forma que esse segmento pode ser dividido em geração, transmissão e destruição de energia, o setor de saneamento envolve o tratamento da água, o transporte para os reservatórios e a distribuição aos consumidores.

Sistemas de automação destinados à supervisão de redes de abastecimento de água caracterizam-se pela necessidade de obtenção e envio de informações entre um ou mais centros de controle operacionais (CCOs) a estações remotas situadas nos mais diversos lugares como, por exemplo,urbanos, rurais, espaços de acesso restrito, zonas costeiras e portuárias, espaços subterrâneos ou de topografia elevada.

As tecnologias utilizadas nos sistemas de automação destinados a supervisão de redes de abastecimento de água adequam-se à diversidade de contexto das localidades a que elas devem atender. Toda esta diversidade de tecnologias encontra em sistemas distribuídos de automação e controle, definidos

por Coelho e Lobue (2006. p. 48) como “[...] sistemas de arquitetura computacional autônoma, independente e hierarquicamente integrada.”, como os de Controle Supervisório e Aquisição de Dados (SCADA), a possibilidade de ser integrada em uma única arquitetura de sistema, caracterizada principalmente pela sua abertura e ampla capacidade de expansão.

A integração das informações de processo constitui, segundo Cerri (2004), a base para o estabelecimento de um sistema Integrado de Gestão Empresarial (ERP) que possibilite o gerenciamento e a disponibilização racional da grande quantidade de dados envolvidos na supervisão dos sistemas de abastecimento de água.

2.3 Sistemas Distribuídos de Automação e Controle

Segundo Pereira (1995 apud SOUZA, 2006, p. 28), “A automação [...] possibilita a coleta metrológica e precisa de dados que podem ser empregados para se obter a otimização do processo”. Nesse sentido, os sistemas de automação possibilitam, portanto, a redução do custo de todo o sistema produtivo, com o consequente aumento dos lucros e a diminuição de perdas.

Paralelamente aos pontos positivos da automação de sistemas, a automação industrial implica também elevados investimentos iniciais e custos de manutenção mais altos, pois depende de mão de obra altamente qualificada. Em geral, esses inconvenientes são compensados pela garantia de qualidade da produção que, dessa forma, torna-se mais homogênea, monitorada pelo estabelecimento de padrões mais rígidos a serem atingidos.

De acordo com Coelho e Lobue (2006, p. 12), “[...] o desenvolvimento do controle industrial tem sido fortemente influenciado pela tecnologia dos dispositivos micropocessados, que possibilitaram tornar o controle dos processos industriais totalmente distribuídos”. Mesmo antes da revolução da eletrônica, o controle automático de processos contínuos já era orientado a um modelo de arquitetura distribuída. Esta arquitetura, no entanto, não era integrada; como resultados disso, os componentes do sistema de automação funcionavam de forma desorganizada por meio de um conjunto de malhas de controle independentes.

As primeiras aplicações do computador no controle de processos foram forçosamente centralizadas devido ao alto custo desse equipamento na época. A tendência encontrada atualmente é a da integração de todo ou grande parte do sistema, permitindo um controle hierarquizado por meio da introdução do conceito de níveis de acesso, que implica modos diferenciados de acesso para operadores de sistemas, engenheiros de processo e engenheiros de desenvolvimento, cada qual com privilégios diferenciados no sistema de controle, caracterizados por meio de senhas ou identificação biométrica.

2.4 Sistemas Geograficamente Descentralizados e de Arquitetura Distribuída

Algumas abordagens de arquiteturas distribuídas são descritas na literatura científica em várias áreas de aplicação. Dentre os modelos de sistemas de automação e controle que fazem uso dessa arquitetura destacam-se mais fortemente os baseados e Sistemas Digitais de Controle Distribuído (SDCDs) ou nos SCADA. O primeiro modelo vem ao encontro de sistemas de controle concentrados geograficamente como os encontrados em plantas industriais de produção. Já o segundo vem ao encontro de sistemas que possuem suas unidades geograficamente descentralizadas, ou seja, distribuídas em bairros ou cidades como é o caso dos sistemas de abastecimento de água.

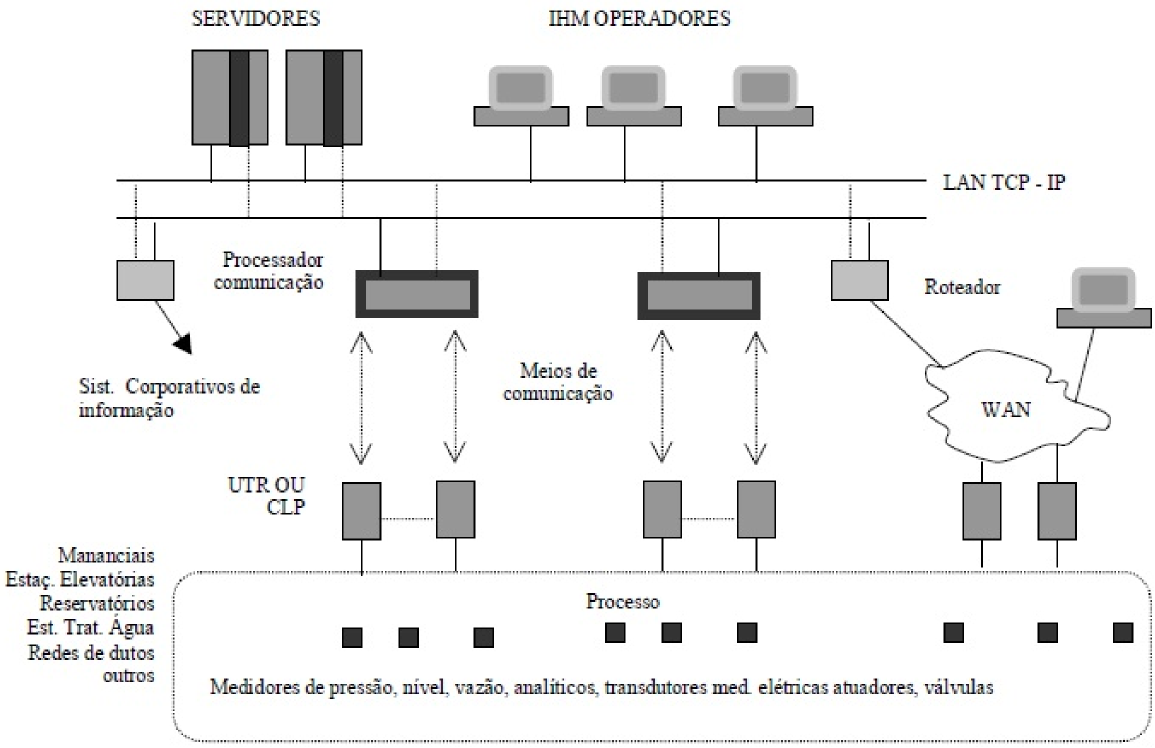
A maioria das aplicações SCADA usa a tecnologia de agentes que, como proposto por Ebata (2000), fazem uso de intranets, definidas no dicionário eletrônico Houaiss (2008) como “redes locais de computadores, circunscritas aos limites internos de uma instituição, nas quais são utilizados os mesmos programas e protocolos de comunicação empregados na internet”, que são utilizadas como plataformas de comunicação para estes sistemas. Sua argumentação principal baseia-se no desempenho e na confiabilidade em tempo real, os quais constituem fatores para a solução de alguns problemas.

Essas soluções vão ao encontro de uma arquitetura genérica que aplica a metodologia de sistemas multiagentes na automação de sistemas distribuídos. Nesta metodologia os agentes têm a função de prover maior autonomia para cada parte constituinte do sistema de controle.

Nessa arquitetura, os agentes são designados para diferentes funções, tais como monitorar e controlar o sistema de abastecimento de água, ler

dispositivos, armazenar dados e prover interface gráfica. Um exemplo de agentes típicos dos sistemas automáticos distribuídos pode ser visto na Fig. 2:

Figura 2 – Representação de um sistema automático distribuído



Os agentes têm que ser identificados, por endereços ou TAGs digitais (sigla referente a codificação de equipamentos ou dispositivos de campo em processos industriais), de maneira inequívoca no ambiente em que operam. Isso possibilita que o controle, a comunicação e a cooperação entre eles ocorram. Um agente pode ser acessado onde quer que esteja, possibilitando a implementação de um mecanismo seguro quanto a falhas.

A motivação para a operação cooperativa autônoma tem sua sustentação na necessidade de executar missões críticas com restrições de tempo, recursos e disponibilidade que, muitas vezes, estão além da capacidade de um único agente. No caso dos agentes estarem geograficamente descentralizados ou distribuídos, a operação cooperativa e uma abordagem adequada, fornecendo suporte a:

- compartilhamento de informações
- compartilhamento de recursos;
- alocação eficiente de recursos;
- respostas orientadas a contexto e situação;
- robustez e flexibilidade sob mudanças de condições;
- redundância.

Uma característica chave da arquitetura proposta é a de que todos os agentes são idênticos em relação a como são percebidos por outros agentes, ao processamento de informação, a tomada de decisão e a capacidade de comunicação, independente de sua função. Dessa forma, um agente pode ser facilmente substituído no caso de falha.

Uma arquitetura para automação distribuída, de acordo com o modelo apresentado, exige o estabelecimento de um arcabouço tecnológico que abranja desde tecnologias direcionadas a comunicação entre computadores até aquelas direcionadas a sofisticadas técnicas de controle.

2.5 Conceitos Básicos Envolvidos no Controle de Sistemas Distribuídos

De acordo com a definição do dicionário eletrônico Houaiss (2008), um processo é uma “sequência contínua de fatos ou operações que apresentam certa unidade ou que se reproduzem com certa regularidade”.

Atualmente estima-se que a vasta maioria dos sistemas de controle de processos contínuos implementa uma estratégia tipo PID (Proporcional – Integral – Derivativa) para controle de suas malhas. Esta larga utilização se deve ao fato de que o controle baseado no algoritmo PID conduz a soluções bastante satisfatórias a maioria dos sistemas, incluindo os de abastecimento de água.

Quatro importantes operações básicas devem estar presentes em todos os sistemas de controle:

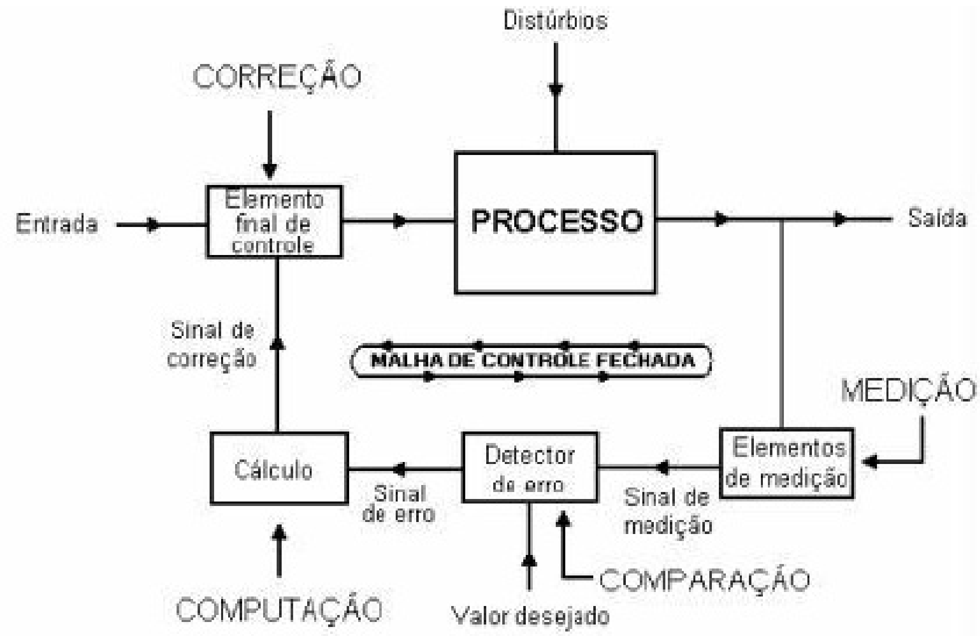
- Medição: a medida da variável controlada e/ou de distúrbio é usualmente feita por combinação de sensores e transmissores.

- Comparação: operação que compara o valor da variável controlada e/ou de distúrbio com um valor específico, que deve orientar a tomada de decisão do sistema de controle.

- Computação: operação baseada na medição e na comparação que possibilita ao controlador decidir o que fazer para manter a variável em um valor desejado.
- Correção: resultado da decisão do controlador, o sistema é submetido a uma ação. É normalmente executada pelo elemento final de controle.

Estas operações são ilustradas no diagrama de fluxo da Fig. 3 que representa um processo industrial:

Figura 3 – Processo realimentado em malha fechada de controle



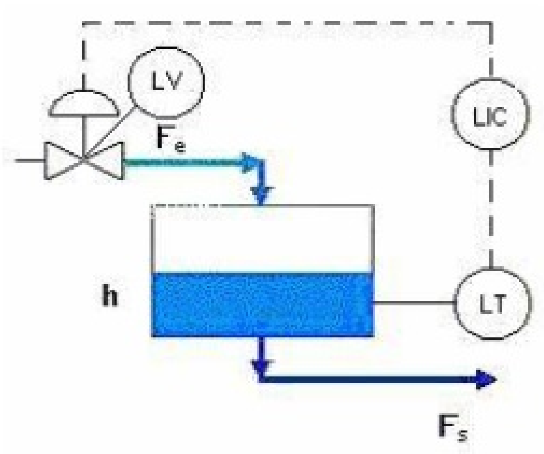
A Fig. 3 ilustra como a partir da medição da variável de saída do processo (ou variável controlada), é possível efetuar a correção da variável de entrada (ou manipulada), em função de um valor previamente determinado.

Define-se, portanto, como o principal objetivo do controle de processos utilizarem a variável manipulada (variável alterada por meio do elemento final de controle) para manter a variável controlada em um valor desejável, valor este também denominado de setpoint. Este procedimento deve ocorrer de forma independente as perturbações externas.

Quanto à estratégia de controle, Pioversan (1993) afirma que os sistemas de controle automático podem ser classificados em dois tipos:

➢ Controle realimentado (Feedback): o valor da variável controlada é medido e o comparado com um setpoint, sendo a diferença (erro) usada para ajustar a variável manipulada. A desvantagem desta estratégia de controle é o fato da resposta ocorrer após haver desvios na variável controlada. Na Fig. 4 é ilustrada uma aplicação típica desta estratégia de controle na automação de um sistema de controle de nível de um reservatório.

Figura 4 – Diagrama de Controle de nível de reservatório



➢ Controle antecipatório (Feedforwared): por meio de medições das variáveis de carga modifica-se a variável manipulada de forma a compensar uma alteração antes que ela ocorra. A desvantagem deste método está no fato de não haver medição da variável controlada, que tem a sua estabilidade muito vulnerável, uma vez que tal estabilidade depende apenas da precisão da relação entre as variáveis de carga medidas e da alteração na variável manipulada.

Considerando-se estas duas estratégias, entende-se que o controle realimentado, quando devidamente sintonizado, pode ser empregado, sem prejuízo ao sistema de abastecimento de água, em sistemas de capacitância considerável, onde oscilações da variável controlada por um curto período são toleráveis. Exemplos desses sistemas são os de controle de nível de grandes reservatórios e também os de dosagem de produtos químicos em linhas de abastecimento de água

onde a vazão de adução de água em um reservatório antes de ser distribuída para consumo.

O sistema antecipatório, em contrapartida, demanda uma estratégia de controle que previna o afastamento da variável controlada de seu valor desejável, antecipando distúrbios e compensando modificações do processo de forma a atuar na correção antes de oscilações na variável principal ocorram. Para tanto, adota-se uma estratégia híbrida de controle, onde variáveis de distúrbio são utilizadas para antecipar uma correção.

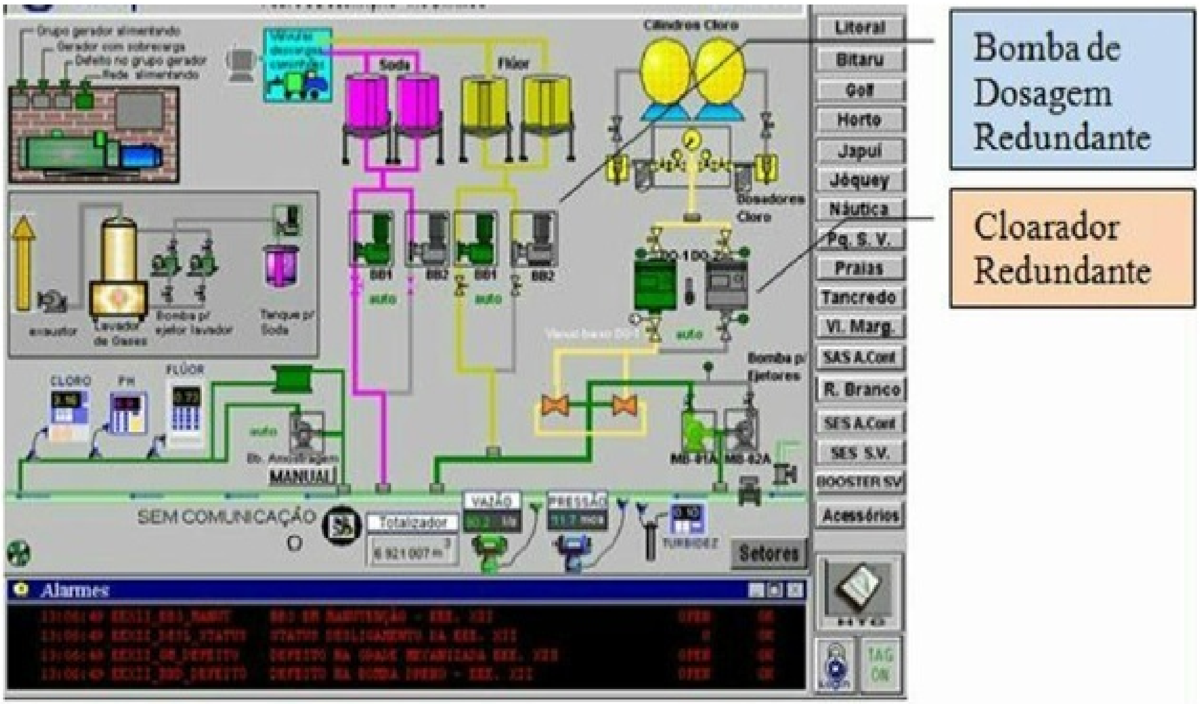
Este tipo de estratégia caracteriza-se por ser um hibrido entre o controle realimentado e o antecipatório e tem seu uso, por exemplo, em sistemas de dosagem de produtos químicos em marcha, em que a vazão de adução vai diretamente para consumo após a dosagem de produtos como cloro e flúor.

Pode-se descrever um algoritmo PID e as estratégias que ele possibilita independentemente do dispositivo que o executa. Um sistema supervisório moderno é capaz de comandar dezenas de malhas de controle que são implementadas em um nível inferior de controle por meio dos agentes de controle definidos Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) e controladores industriais de uso dedicado do tipo single loop (capazes de controlar uma única malha de controle) e multi loop (capazes de controlar mais de uma malha de controle).

Os parâmetros de configuração do algoritmo PID são enviados para a memória do controlador de campo (nível inferior de controle) por meio de agentes de comunicação do sistema. O operador pode, então, realizar a sintonia da malha durante a sua partida ou durante a parada de subsistemas, guiado por uma tela de tendência que mostra os valores das variáveis.

Importante ressaltar a necessidade de redundância dos dispositivos de controle presentes nas estações remotas dos sistemas de abastecimento de água. Tais dispositivos, exemplificados na Fig.5, devem possibilitar a troca automática ou o acionamento manual dos elementos finais de controle de forma a estabelecer condições mínimas de controle enquanto a falha no sistema automático principal é sanada. Paralelos a esta contramedida, benefícios inerentes ao sistema de multiagentes como a cooperação entre agentes e comunicação imediata da falha, completam o sistema de contenção da arquitetura de controle distribuída.

Figura 5 – Ilustração de um sistema de supervisão demonstrando bomba de dosagem redundante.



2.6 Conceitos Básicos Envolvidos na Comunicação de Sistemas

Desde 1838, quando Samuel F. B. Morse transmitiu, pela primeira vez, uma mensagem telegráfica através de uma linha de cerca de 15 km, desde então os sistemas elétricos para comunicação estão sendo mais e mais utilizados para permitir a transferência de informações entre homens e máquinas.

A comunicação por meio do telefone,rádio e televisão é considerada corriqueira no dia a dia. Da mesma forma, estão se tornando cada vez mais comuns as ligações entre computadores situados em locais distantes. Dentre as formas de comunicação elétrica, uma das classes que mais se desenvolveu nos últimos anos e que continua crescendo rapidamente é justamente a da área de comunicação de dados.

Em primeiro momento, a maneira mais simples de representar um sistema de comunicação de dados seria considerar apenas uma fonte e um destino, como representado na Fig. 6:

Figura 6 – Simplificação de um meio de comunicação



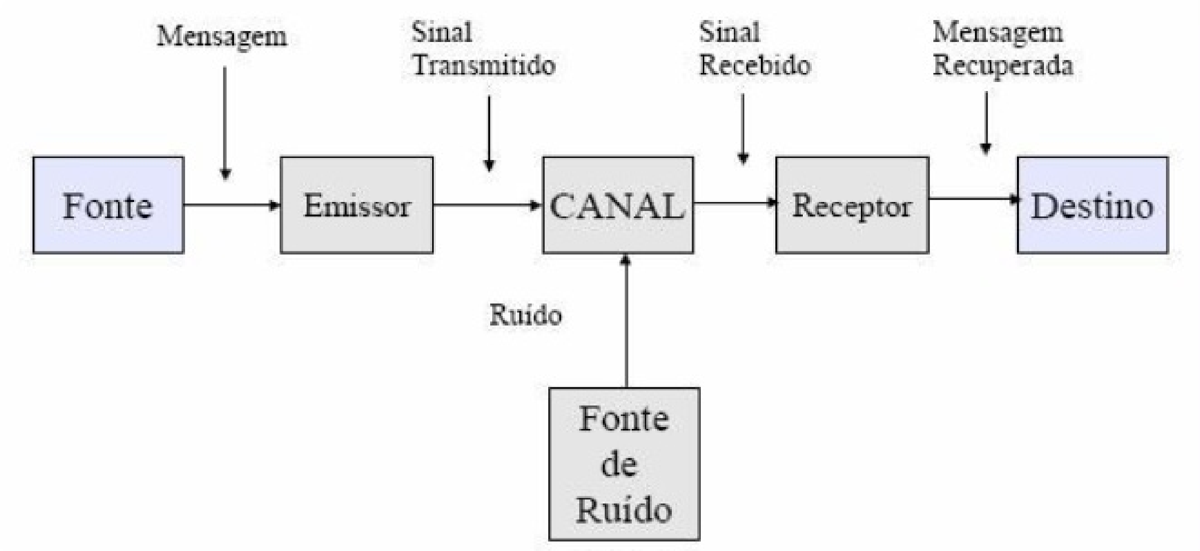
O símbolo é um conjunto ordenado de elementos. Por exemplo, dispondo-se dos elementos A, B e C, podem-se compor símbolos AA, AB, BB, ou ainda símbolos como AAA, BBA, BBB, ... ou, dispondo de elementos 0 e 1, podem-se compor os símbolos 1,0,10,11, ... , 1000, ou ainda, dispondo-se dos elementos 0,1,2, ... , 9, v, + e -, podem-se compor símbolos +5v, -3v, 0v, etc.

Os símbolos são utilizados para representar configurações de um sinal como os símbolos podem ser formados por um único elemento, o elemento também pode constituir uma representação de um sinal. Pode-se pensar que um sinal, de forma intuitiva, conforme os seguintes exemplos “letra do alfabeto”, “dígito binário”, “fonema da pronúncia”, “voltagem”, “corrente elétrica”, etc.

Para cada um destes exemplos pode-se imaginar diferentes configurações para a composição representativa da informação. Dentro dos sistemas de abastecimento de água, tais mensagens constituem informações relacionadas a vazões de adutoras, níveis de reservatórios, concentração de elementos químicos e características químicas da água, entre outras. Estas mensagens são construídas a partir de um conjunto ordenado de símbolos em que a fonte, seja ela uma estação remota ou o sistema de supervisão, selecionada para compor uma informação.

Todos os sistemas de comunicação, independente da natureza da informação transmitida ou dos sinais utilizados podem ser analisados segundo o modelo da Fig. 7:

Figura 7 – Modelo de um sistema de comunicação



Neste modelo podem-se identificar os seguintes componentes:

- A fonte que, geralmente, não dispõe de potencia suficiente para cobrir as predas da propagação do sinal. Esta potencia é suprimida pelo emissor. Nos sistemas de controle de redes de abastecimento de água. Este componente pode ser representado, por exemplo, por um CLP instalado em uma estação remota, exemplificado na Fig.8.

- O emissor é o ente que, acionado pela fonte, entrega um sinal de energia adequado a transmissão pelo canal. Nos sistemas de controle de redes de abastecimento de água este componente pode ser representado, por exemplo, por um modem, como exemplificado na Fig. 8, por um radio modem ou por um roteador.

- O canal (meio) é o ente que propaga a energia entregue pelo emissor até o receptor, permitindo que o sinal seja transmitido, geralmente cobrindo distâncias razoavelmente grandes. Nos sistemas de controle de redes de abastecimento de água este componente pode ser representado, por exemplo, por linhas

telefônicas, linhas digitais de transmissão ou por canais de frequência.

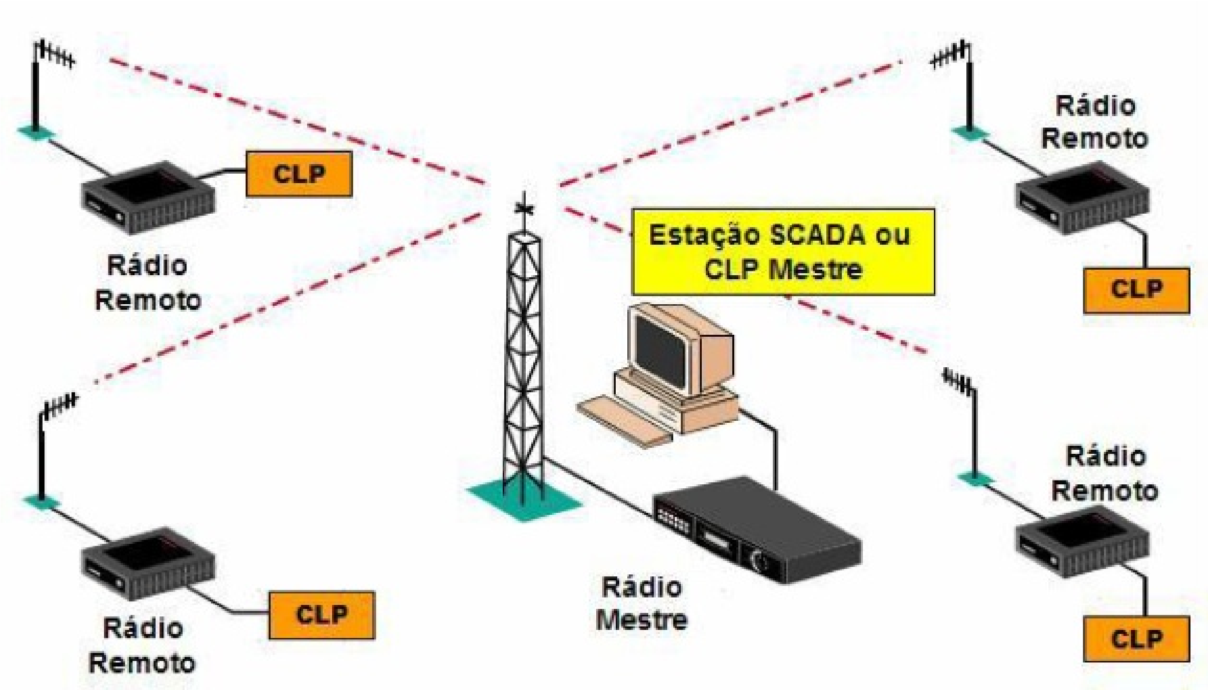
- O receptor é o ente que retira a energia do meio e recupera os símbolos, de forma tão precisa quanto possível, de modo a reproduzir a mensagem a ser entregue ao destino. Nos sistemas de controle de redes de abastecimento de água este componente pode ser representado, por exemplo, pelos dispositivos de comunicação presentes no CCO ou em outras estações remotas.

- O destino é para onde se dirige a informação. Nos sistemas de controle de redes de abastecimento de água este componente pode ser representado, por exemplo, pelo sistema de supervisão ou por dispositivos de controle presentes em outras estações remotas.

Deste modo, o emissor e o receptor desempenham funções inversas e complementares com relação ao meio que os interliga. Existe um fluxo de sinal entre o emissor e o receptor e este sinal contem os símbolos portadores da informação. Em condições ideais o sistema deveria se comportar de modo que a mensagem produzida pela fonte conseguisse ser fielmente recuperada pelo receptor. Na prática, isto não ocorre: No processo de transmissão, limitações físicas e outros fatores alteram as características do sinal que se propaga, produzindo o que se chama distorção.

Além disso, no canal, aparecem sinais espúrios de natureza aleatória, que se somam ao sinal, produzindo ruído. Este eleito é representado esquematicamente pela adição de um bloco, correspondendo a uma fonte externa geradora de ruído, simbolizando todos os ruídos presentes no canal, como mostrado na Fig. 8.

Figura 8 – Modelo de transmissão de estações remotas até o CCO



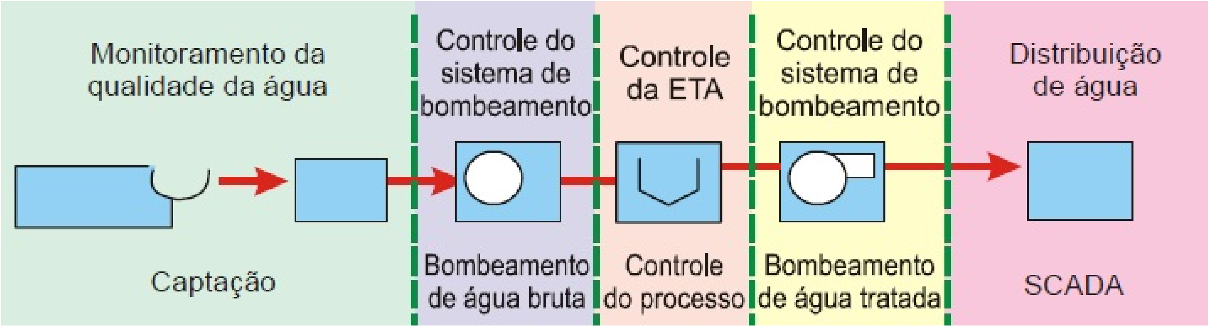
Um dos maiores problemas observados nos sistemas de comunicação envolvendo dispositivos de automação consiste em manter tanto a distorção como o ruído em níveis aceitáveis, de modo que, na recepção, a mensagem possa ser recuperada e a informação correta entregue no seu destino.

A Anatel (2011) disponibiliza em seu sítio eletrônico manual de projeto técnico que descrevem a forma de apresentação e solicitação para aprovação por parte das concessionárias de abastecimento procedimento de transmissão

2.7 Conceitos Básicos Envolvidos na Supervisão de Sistemas Distribuídos

Os benefícios de uma arquitetura distribuída baseada em multiagentes, como a proposta por Ebata (2000), não podem ser aproveitados em uma integração adequada de todo o sistema. Tal integração ocorre por meio do núcleo do sistema SCADA, o denominado sistema de supervisão ou supervisório, conforme ilustrado pela Fig. 9.

Figura 9 – Ilustração de um sistema de distribuição controlado por SCADA



Os sistemas de supervisão de processos industriais coletam dados do processo por meio de estações remotas e formatam estes dados e os apresentam ao operador em uma multiplicidade de formas. O objetivo principal dos sistemas de supervisão é o de propiciar uma interface de alto nível ao operador, informando-o “em tempo real” sobre todos os eventos de importância do sistema.

Os sistemas de supervisão oferecem, no mínimo, três funções básicas:

- Funções de monitoramento: incluem todas as funções de visualização do processo como: sinóticos animados, gráficos de tendência de variáveis analógicas e digitais, relatórios em vídeo e impressos, etc.

- Funções de operação: incluem ligar e desligar dispositivos, parametrização e operação de malhas PID, mudança do modo de operação de equipamento, etc.

- Funções de controle: executadas por meio do tipo de controle DDC (Digital Direct Control) ou Controle Digital Direto, inerente aos sistemas de supervisão que, por meio de uma linguagem que permite definir diretamente ações sem depender de um nível intermediário de controle localizado em estações remotas inteligentes, atua diretamente no processo. Todas as operações de entrada e saída são executadas diretamente através de cartões que são comandados pelo sistema de supervisão. Os dados são amostrados, um algoritmo de controle é executado

internamente ao computador e o sinal de saída é aplicado ao processo.

A escolha do tipo de controle deve considerar a velocidade de comunicação disponível entre os agentes, que por meio deste tipo de estratégia, pode tonar o controle contínuo de malhas proibitivo na maioria dos sistemas de supervisão de redes de abastecimento de água baseados em arquiteturas distribuídas.

O tipo de controle digital é aplicável em sistemas de acionamento remoto orientados a processo descontínuos. Tal tipo de controle, em geral, demanda um determinismo que tolera, em até alguns segundos, a atuação nos dispositivos.

Deve-se, no entanto, considerar que intervenções no sistema de supervisão tendem a desligar, ainda que momentaneamente, os algoritmos de controle que funcionam em sua base de dados. A concentração de muitas malhas de controle em um sistema central vem de encontro a proposta estabelecida pela arquitetura de controle de sistemas distribuídos, que é a de autonomia de funcionamento em caso de falha de um ou mais agentes do sistema de controle.

Os sistemas de supervisão gerenciam um determinado numero de objetos, também denominados TAGs, que espelham o comportamento das variáveis de processo monitoradas e comandadas, além de variáveis auxiliares internas ao sistema de supervisão.

O numero de objetos gerenciados varia de acordo com o porte do sistema, porém existe um consenso com relação a necessidade de otimização do gerenciamento desses objetos. Se o número de variáveis supervisionadas e de operações executadas pelo sistema de supervisão for muito grande, a velocidade de processamento e o tempo de varredura podem vir a comprometer a supervisão das estações remotas. Deve-se, portanto em prol da operabilidade e da rápida intervenção em caso de emergências, definir prioridades de leitura e atuação dos TAGs do sistema. Para tanto, os sistemas de supervisão dispõem de opções em que se podem estabelecer, para cada TAG, índices de prioridade que serão levados em conta em caso de utilização em demais da capacidade de processamento do sistema. Em geral, os níveis mais altos de prioridade são estabelecidos para TAGs críticos de alarme como detecção de vazamento de produtos químicos, níveis de extravasão de reservatórios, pressões muito altas ou muito baixas de adutoras.

A atividade de configuração de um supervisório compreende resumidamente duas etapas:

- Definir cada variável de processo na base de dados.

- Definir telas gráficas.

A definição de dados é criada no modo de desenvolvimento, módulo do software de supervisão que permite ao desenvolvedor a configuração dos TAGs.

Os TAGs, como descrito anteriormente, espelham o comportamento das variáveis de processo monitoradas e comandadas, numéricas ou alfanuméricas, envolvidas na aplicação: podem ser utilizados em funções computacionais (operações matemáticas, lógicas, com vetores ou strings – sequencia ordenada de caracteres ou símbolos escolhidos a partir de um conjunto pré-determinado) e podem também representar pontos de entrada/saída (sensores/atuadores) de dados do processo que está sendo controlado, etc. Neste caso, os TAGs correspondem as variáveis do processo real como, por exemplo; nível de um reservatório, vazão de uma adutora, ph da água, etc, comportando-se como a ligação entre software supervisório e o sistema de controle.

A configuração dos TAGs do sistema envolve também o estabelecimento das faixas dos dispositivos aos quais eles espelham (no caso dos TAGs de campo) e também dos níveis de alarme relacionados ao sinal enviado por cada dispositivo ou ponto de campo. Cabe aqui a adoção de um critério que leve em conta o número elevado de sinais envolvidos em um sistema de abastecimento de água urbano. Como há centenas de pontos monitorados e comandados, devem ser configurados para geração de alarmes, apenas aqueles pontos cujo comportamento excepcional deva, de fato, ser digno de atenção por parte do operador de sistemas. A configuração de níveis de alarme para a maioria dos pontos gera históricos de alarmes muito extensos, muitas vezes impossíveis de serem acompanhados em tempo real.

A definição das telas gráfica socorre por meio do módulo de desenvolvimento de sinóticos, que são telas do processo que permitem a visualização sintética do funcionamento de uma planta industrial. Estas telas gráficas fornecem uma representação geral do sistema em substituição aos painéis sinóticos tradicionais. Cada sinótico representa uma área do sistema de abastecimento de

água em certo nível de detalhe. Para se obter uma visão mais detalhada de uma determinada área pode-se recorrer a um novo sinótico, a um sinótico de hierarquia inferior (sub-sinótico), ou a uma visão de uma outra camada do mesmo sinótico (sistema multilayer).

Para alguns tipos de processo, recomenda-se o uso de um sinótico tipo plano infinito que traz a representação global de um sistema distribuído geograficamente, tal como uma rede de adutoras, um sistema de controle de tráfego de uma cidade, um sistema de controle de subestações de energia, etc. Esta técnica é denominada *full-graphics* e requer um poder computacional relativamente elevado.

No módulo de desenvolvimento gráfico, o desenho é formado livremente pela combinação de entidades geográficas fundamentais como retas, retângulos, elipses e círculos, textos e figuras “bitmapeadas” e “vetoradas”, arcos, etc.

Os símbolos definidos são armazenados numa biblioteca. Se a representação armazenada corresponde a descrição das entidades geométricas temos uma biblioteca orientada a geometria. Se o símbolo armazenado corresponde a uma configuração fixa de bits (mapa de bits), temos um editor “bitmapeado”.

Sinóticos com estrutura geométrica de dados (modelados) são mais flexíveis para modificações futuras e parecem ser uma tendência dentre os sistemas SCADA atuais. Sinóticos “bitmapeados” permitem definir um maior nível de detalhe para cada símbolo.

Os sinóticos são formados por elementos estáticos e dinâmicos; estes últimos, geralmente associados à TAGs, constituem animações como barras gráficas (ideais para demonstrar níveis de reservatórios), mudanças de cor (utilizados para indicar mudanças de status de dispositivos discreto como válvulas ON-OFF), deslocamento de objetos pela tela e links textuais/numéricos.

Existem ainda elementos de tendência que, uma vez associados a um ou mais TAGs, permitem a visualização do gráfico de comportamento das variáveis de campo ou internas associadas a estes TAGs.

Todos os elementos configurados nas telas gráficas podem oferecer, além da capacidade de monitoramento das variáveis, a capacidade de atuação nos elementos de campo por meio do mouse e do teclado de um computador.

Dentro de uma proposta de metodologia para elaboração de interfaces gráficas para sistemas de controle complexos, como os de abastecimento de água, há de se considerar os seguintes fatores:

- O número elevado de variáveis e, consequentemente, de telas de sistema deve conduzir o desenvolvedor a representação gráficas do tipo plano infinito, partindo de um mapa geral do sistema focalizando, a cada clique uma determinada região do mapa em um plano mais detalhado da região desejada.

- A padronização das telas deve considerar a usabilidade intuitiva do sistema. Para tanto, é imprescindível que a equipe de operação participe do desenvolvimento das telas do sistema de abastecimento de água, pios os operadores são os usuários ativos deste sistema.

- A padronização da nomenclatura dos dispositivos e de seus status deve obedecer a codificações normalizadas, de forma que a uma representação por meio de sinótico seja a mesma encontrada no campo pela equipe de operação ou manutenção local.

- O sistema de alarmes deve ser idealizado a partir de um conceito de hierarquia, de forma que os mais críticos possam ser visualizados mesmo que o operador esteja em outra tela do sistema. O deslocamento imediato para a tela que apresenta o alarme deve ser viabilizado por meio de botões e acesso rápido ou de teclas de atalho.

- Os sistemas de atuação que envolva consequências irreversíveis ou de grade impacto devem contar com botões ou sequencias de confirmação que façam o operador refletir sobre a execução de determinadas ações, como por exemplo, a decisão sobre o

fechamento de válvulas de adutoras que se encontrem pressurizadas.

- Todo o nível de operação deve ser hierarquizado, isso significa que ao apresentar-se no posto de supervisão, o operador deve identificar-se no computador entrando com seu nome e senha e, a partir daí, toda operação executada naquela estação passa a ser de sua responsabilidade.

Ao projetar uma interface homem-máquina, o desenvolvedor deve levar em conta a necessidade de:

- Diminuir a chance de erro do operador, principalmente nos momentos de maior demanda operacional que coincide com o aumento do stress físico e mental. Por isso é necessário que as entidades de processo sejam representadas de forma única e consistente, independentemente do tipo de equipamento fisicamente presente no processo. A presença de instrumentos e equipamentos que embora exerçam a mesma função, mas tenham interface e parametrização local diferente, é muito comum em sistemas extensos e expansíveis como os de redes de abastecimento de água urbano. Esta representação é possível por meio de instrumentação virtual, em que os instrumentos representados na estação de operação independem de marca, modelo ou parametrização física dos instrumentos instalados no processo.

- Evitar as situações de monotonia que levam a desconcentração do operador, sinóticos pouco representativos do processo e sem atrações de animação ou com muitos dados tubulares levam a um cansaço natural. Muitos elementos piscantes na tela também trazem cansaço. O ideal é que ocorra um equilíbrio das interfaces com cores predominantemente neutras para os elementos de *background*.

Os sinóticos devem ser elaborados levando em conta conceitos ergonômicos relacionados a movimentação dos olhos. Como exposto por Petterson (1989) em seu estudo sobre usabilidade, os olhos tendem a se mover de:

- Uma imagem grande para uma menor;
- Uma cor saturada para uma não saturada;
- Uma cor brilhante para a cor pastel;
- Uma imagem colorida para uma imagem monocromática;
- Formas simétricas para formas assimétricas;
- Algo que se move e pisca para uma imagem estática

Há também de se evitar a necessidade de consultas a referências externas ao sistema. Se o operador do sistema de abastecimento de água tiver dúvidas quanto à operação de elementos do sistema de supervisão deverá consultar o próprio sistema (*help online*). Se tiver dúvidas com relação à operação do processo deverá consultar um guia operacional *online.* Manuais são difíceis de consultar numa emergência.

2.8 Conceitos Básicos de Acionamento e Controle de Motobombas.

Existem diversos modos de acionamento e controle para os conjuntos motobombas de uma estação elevatória, em sistema maiores é viável a implementação de um acionamento por inversor de freqüência, mostrado na Fig. 15 com controle por corrente 4 a 20mA conectado a um controlador lógico programável executando uma rotina ou algoritmo pré-estabelecidos, nesta situação é possível reduzir o bombeamento de água quando não existe demanda de consumo, protegendo a tubulação de pressão excessiva, aumentando a vida útil do sistema de distribuição e ainda economizando no consumo de energia elétrica.

Figura 10 – Inversor de Freqüência para acionamento de motobombas



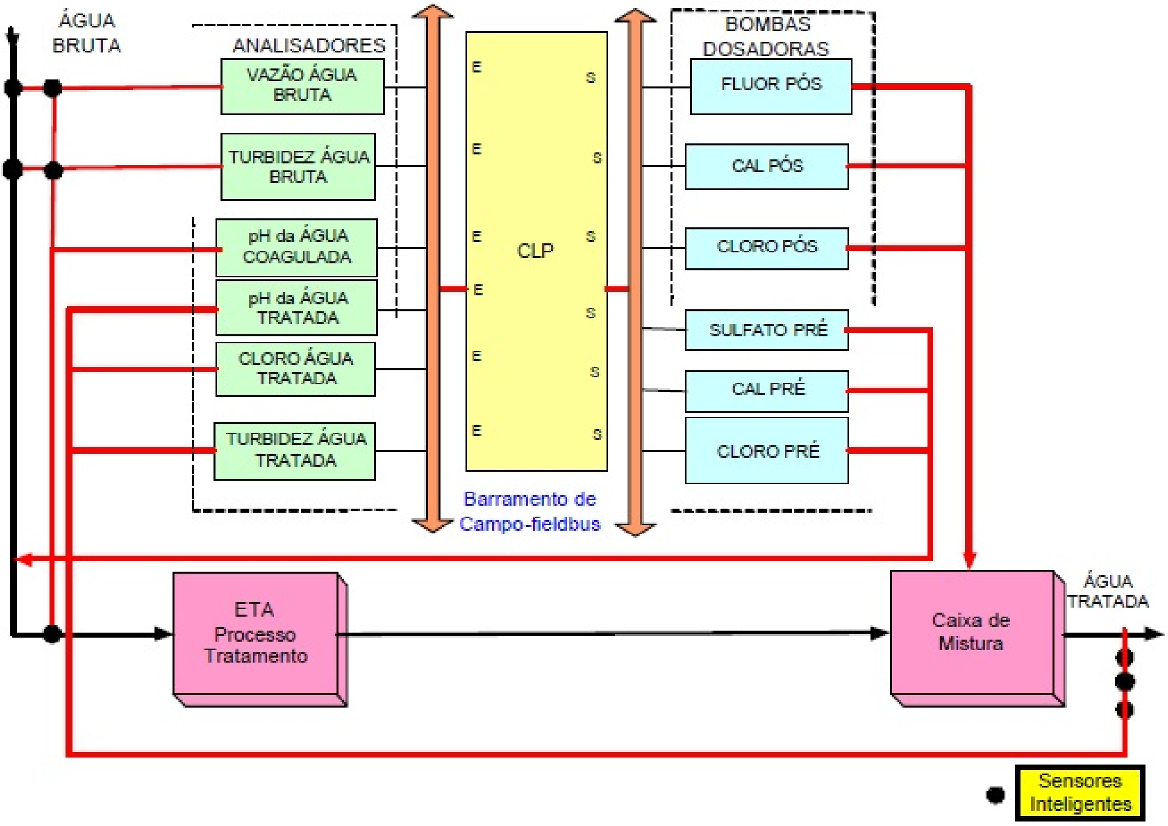
O processo de automatização de uma estação elevatória inicia-se pelo nível hierárquico mais baixo, ou seja, pelos transdutores – equipamentos que transformam grandezas não elétricas em grandezas elétricas.

O controle geralmente é realizado pelos CLPs – equipamentos que recebem as informações dos transdutores – executam a lógica obedecendo rigorosamente a um software isolado e as condições pré-estabelecidas. Os transdutores têm a responsabilidade de transmitir os sinais das variáveis do processo para os atuadores do processo. Os atuadores são os dosadores de um produto químico, controladores de válvulas e de outros dispositivos de acionamento, ou seja, são equipamentos que atuam diretamente no processo de tratamento.

Mediante a interação das três etapas mencionadas acima, obtém-se um processo de tratamento de água automatizado nos dois primeiros níveis de automação – instrumentação e controle. Normalmente, os valores e condições do processo são exibidos em computadores distantes do próprio processo, denominados sistemas de supervisão geralmente instalados em CCO. Fig. 11 ilustra um fluxograma e arquitetura atual de interligação dos transdutores e atuadores de uma ETA convencional, com método tradicional de interligação ponto a ponto. Nota-

se que sensores e atuadores estão interligados no CLP por meio de fiação, ou seja, com padrão de sinal 4-20 mA.

Figura 11 – Exemplo de conexão do CLP com sensores e atuadores



3 METODOLOGIA DO ESTUDO

3.1 REFERENCIAIS DE DESCRIÇÃO

O controle operacional, que demanda hoje todos os dados de vazão, pressão, nível de reservatório e a operação das elevatórias de água bruta e tratada, são feitos precariamente. Na maioria dos casos, estes dados são transmitidos através de sistema de radio e anotados por um operador num boletim de operação, onde só mensalmente é feito o cálculo do volume produzido ao sistema pelo número de horas de bombeamento e comparado com a macro medição que nem sempre os resultados batem com os volumes macro medidos, estes dois dados mostram a não confiabilidade do sistema e a da própria macro medição. Com isto, geram-se informações não confiáveis como os índices de perdas físicas no sistema de distribuição e outros gradientes hidráulicos importantes não operação de adução e distribuição do sistema de abastecimento de água.

O desenvolvimento do modelo proposto visa produzir uma ferramenta útil e prática que fornece subsídios de apoio a decisão para o delineamento de normas simples para a operação de conjuntos elevatórios e, ao mesmo tempo, minimizar os custos de energia elétrica. Com a redução dos custos na energia elétrica a Empresa poderá investir em equipamentos como válvulas de controle de pressão e vazão, compra de computadores e de um programa de transmissão de dados via on-line, treinamento para os operadores, que serão beneficiados por intervirem subjetivamente no sistema e onde executam tarefas de acordo com o grau de experiência pessoal adquirida no exercício de suas atividades diárias.

Klempous et al. (1997) propôs um modelo baseado em trêsníveis:

- o primeiro era controle direto das unidades de bombeamento, ajustes das válvulas de controle, cargas e vazões de um sistema. Nesse nível,baseado num algoritmo de controle, era determinado o número de bombas em funcionamento. Assim como a posição desejada de regulação de válvulas. Os valores recomendados de carga e vazão eram fornecidos como parâmetros do algoritmo de controle, a partir do segundo nível de modelo.

- O segundo, determinava os valores dos parâmetros descritos anteriormente (carga vazão) que garantiam a implementação da demanda aos usuários. Os valores desses parâmetros eram obtidos da minimização dos custos de energia elétrica. Como resultado deste nível, obtém-se um gráfico ilustrando a cooperação entre estações de bombeamento e reservatório.

- O terceiro nível determinava um gráfico ótimo para enchimento dos reservatórios. Este era baseado no histograma previsto de demanda dos consumidores. O algoritmo garantia o atendimento da demanda e aminimização dos custos de energia considerando a variação dos preços de energia elétrica.

A metodologia de otimização proposta, leva em consideração uma função objetivo, que é representada, numa primeira etapa, pelos custos energéticos de bombeamento de acordo com o sistema tarifário em vigor, ou seja, a minimização de custos operacionais decorrentes do consumo de energia elétrica, e, numa segunda etapa, os custos com manutenção, representados pelo número de liga-desligas dos conjuntos motor bomba, são minimizados nas estações de bombeamento. Associadas a busca pela minimização de custos, existe o requerimento de satisfazer as restrições técnicas-operacionais e, entre elas, se destaca os modelos de simulação hidráulica.

Os modelos de simulação de redes de distribuição de água consistem basicamente do equacionamento das vazões nos trechos de uma rede e das cargas hidráulicas nos nós entre trechos consecutivos. A simulação hidráulica avalia as respostas do sistema em termos das suas variáveis de estado: pressão, vazão e níveis nos reservatórios, face as diversas conjunturas operacionais. É, portanto, uma ferramenta essencial à avaliação dos objetivos estabelecidos. A solução é obtida por análises sucessivas, com alterações impostas pelos usuários, ou em combinação com modelos de otimização, onde a solução é obtida automaticamente. Neste trabalho, o simulador utilizado é o Matlab com o toolbox de otimização.

O Matlab (que abrevia Matrix Laboratory – Laboratório de Matrizes) é um programa de computador de uso especifico, otimizado para executar cálculos científicos e de engenharia. Ele nasceu como um programa para operações matemáticas sobre matrizes, mas ao longo dos anos transformou-se em um sistema computacional flexível capaz de resolver essencialmente qualquer problema técnico. O programa Matlab faz uso de uma linguagem específica, similar a outras

linguagens de programação, e oferece uma ampla biblioteca de funções predefinidas para que a programação técnica se torne mais fácil e eficiente.

3.2 Otimização da Operação das Estações Elevatórias

As técnicas de otimização vêm sendo utilizadas na busca de soluções ótimas para problemas operacionais específicos. Se o objetivo for, por exemplo, o mínimo custo operacional, a função custo estará associada à tarifa de energia elétrica, ao rendimento das bombas, às perdas de carga nas instalações, etc. Por outro lado, há restrições impostas pelo próprio sistema, tais como, níveis máximos e mínimos dos reservatórios, limites de pressão e de potencia e quantidade de água disponível.

Algumas dificuldades decorrem da utilização das técnicas de otimização para a solução do problema do controle. Estas dificuldades estão associadas ao grande número de equações a serem resolvidas, à dificuldade de formulação do problema geral, ao tratamento de restrições operacionais não explícitas e à aquisição e manutenção de dados. Além disso, os algoritmos desenvolvidos, normalmente, requerem um alto tempo computacional para atingir uma solução, que, geralmente, não é um ótimo global.

Dentro deste contexto, foram testadas algumas metodologias baseadas em programações linear, linear inteira e não linear e algoritmo genético, além de um método puramente heurístico, para efeitos comparativos, no sentido de delinear a busca de uma melhor metodologia para resolver o problema. Portanto, será apresentada neste capítulo a formulação matemática das metodologias que foram usadas para analisar os seus desempenhos com relação à aplicação em um subproblema da descrição apresentada. (SHAMIR, 1977 ;ALPEROVITS ;SHAMIR).

Num primeiro teste de desempenho, usando programação linear, não linear e algoritmo genético, permite-se que as variáveis de decisão assumam valores fracionários. Num segundo teste, aplicam-se programação linear inteira as variáveis de decisão da programação linear com intuito de as tornarem inteiras e compara-se os resultados com um método heurístico que foi usado por Machado *et. al.* (2005) e Barbosa (2001).

Em face dos testes realizados, optou-se por resolver o problema geral em duas etapas: na primeira etapa resolve via programação linear, assumindo

que as variáveis de decisão podem assumir valores fracionários e minimizando os custos operacionais, e na segunda etapa resolve via programação quadrática, minimizando o número de operações liga-desliga, ao mesmo tempo em que procura converter valores fracionários de tempo em valores inteiros. Nesta segunda etapa, reduz-se, naturalmente, o número de variáveis fracionárias e tem-se como função objetivo uma função quadrática, que apresenta um bom desempenho computacional. Clingenpeel (1963)afirma que mais de 50% dos custos anuais das empresas de saneamento são com energia elétrica, nos quais 95% do orçamento de energia elétrica pode será associado com os custos de bombeamento.

Considerando condições ideais de recebimento de água por parte da estação de tratamento de água, a Fig. 12 mostra a estação elevatória de água Vivi Xavier, que tem a função de atender a demanda da zona norte de Londrina para o abastecimento de dois tipos de reservatórios:

- Reservatório Elevado: com capacidade de 2.000.000 de litros a partir de motobombas de recalque de água.

- Reservatório Apoiado: com capacidade de 5.000.000 de litros é abastecido e esvaziado com motobombas, auxiliando na vazão e equilíbrio de pressão para os consumidores finais.

Figura 12 – Estação Elevatória de Vivi Xavier – Londrina/PR



De acordo com a Sanepar, os poços perfurados no aquífero Guarani retiram água a 900 metros de profundidade, totalizando uma produção diária de 17,3 milhões de litros de água, o que representa 10% da produção do município de Londrina.

Atualmente o sistema elevação e reservação Vivi Xavier é o único que utiliza sistema de resfriamento como mostrado na Fig. 13, pois a água emerge a uma temperatura de 50ºC do aquífero Guarani sendo resfriada a uma temperatura de 27ºC

Figura 13 – Torre de resfriamento de água do sistema Vivi Xavier.



O sistema de bombeamento mostrado na Fig. 14 conta com um conjunto motobomba redundante e outros dois de trabalho conforme a necessidade e nível dos reservatórios.

Figura 14 – Conjunto motobombas da estação elevatória Vivi Xavier.



3.3 MEDIÇÕES DE VAZÕES NO SISTEMA

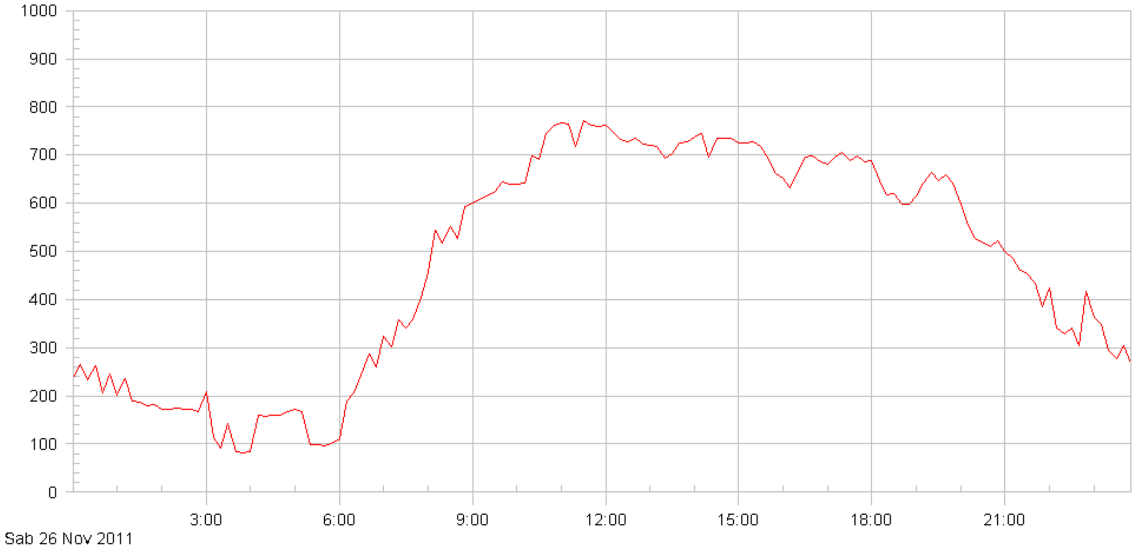
A atividade de medições de vazão do sistema consiste em verificar instantaneamente em litros/s a quantidade de água que está sendo bombeada para os reservatórios, estimando mais precisamente seu nível, o aparelho medidor de vazão ultrassônico portátil Fig. 15, pode operar em uma ramificação de medição, fazendo a leitura por meio da medição da diferença de tempo necessário para que ondas sonoras se desloquementre transdutores montados a jusante e a montante.

Figura 15 – Medidor de vazão do um sistema de bombeamento



O aparelho registra instantaneamente as medições realizadas em intervalos de tempo definidos pelo usuário. Ao final da medição tem-se um registro gráfico da vazão Fig.16, onde se pode obter a vazão média, e a variação da mesma em torno deste valor.

Figura 16 – Registro Gráfico no período de vazão no período de um dia



3.4 MÉTODOS CONTÍNUOS PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO

Na análise de desempenho do sistema por métodos contínuos para as variáveis de decisão foi aplicado as técnicas de programação linear (PL), não linear (PNL). Na utilização das duas técnicas foi utilizado o mesmo formalismo, descrito no item seguinte.

4 PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA EM MOTOBOMBAS DA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA VIVI XAVIER.

4.1 DESCRIÇÃO MATEMÁTICA

A função objetivo assumida foi à minimização do custo de energia tendo como base a tarifa horária de operação. Dessa forma, representa-se, no período de 24 horas, o custo do sistema por:

$$Z = \sum_{i=1}^{ne} \sum_{j=1}^{nb(i)} \sum_{t=1}^{24} X(i,j,t).T(t).P(i,j) \quad (1)$$

Sendo:

Z - custo diário de energia do sistema de abastecimento (R$);

ne- o número de estações elevatórias do sistema;

nb(i) - número de conjuntos motor-bomba da estação elevatória *i*;

t - intervalo de tempo ao longo de um dia ($1 \leq t \leq 24$);

T(t) - a tarifa de consumo (R$/kWh) no período de análise *t*;

X(i,j,t) - o tempo (h) que indica o funcionamento do conjunto motor-bomba *j* da estação elevatória i está ligada durante o intervalo de tempo *t*;

P(i,j) - é a potencia (KW) quando se liga o conjunto motor-bomba *j*, que é dado por:

$$P(i,j) = \frac{9{,}81}{\eta(i,j)} Qf(i,j).H(i,j) \quad (2)$$

η(i,j) - é o rendimento do conjunto motor-bomba j da estação elevatória *i*;

Qf(i,j) - é a vazão firme provocado por ligar o conjunto motor-bomba *j* da estação elevatória *i*, em (m^3/s) e

H(i,j) - é a altura manométrica, ou seja, altura de elevação mais o acréscimo de perdas devido ao aumento da vazão em (mca).

As vazões horárias nas adutoras são caracterizadas pelo funcionamento em paralelo de conjuntos motor-bomba. O cálculo da vazão é estabelecido pelo acréscimo de vazão no acionamento de mais de um conjunto na

mesma adutora. Na caracterização física do sistema faz-se necessário verificar os volumes horários dos reservatórios, os quais obedecem ao princípio da conservação de massa:

$$V(k,t) = V(k,t-1) + \Sigma Qs(k,t) - D(k,t)\Delta t \tag{3}$$

Em que,

$V(k,t)$ é o volume do reservatório k no instante t;

$V(k,0)$ é igual ao volume inicial do reservatório k;

$D(k,t)$ é a demanda (m³/h) do reservatório k no intervalo t;

$\Sigma Qs(k,t)$ é a soma dos volumes correspondentes as vazões que chegam ou deixam o reservatório k no instante t por bombeamento e é dada por:

$$\sum Qs(k,t) = \sum_{i=1}^{ne}\{C.\sum_{j-1}^{nb}[(Q(i,j) - Q(i,j-1)).X\left(i,j+\sum_{j=1}^{i} nb(i-1),t\right)]\} \tag{4}$$

Onde,

$Q(i,j)$ é a vazão (m³/h) da quantidade de bombas funcionando em paralelo na estação elevatória i, $Q(j,0)=0$;

C é característica da estação elevatória em relação ao reservatório, igual a +1 se estiver enviando água para o reservatório, -1 se estiver tirando água e 0 (zero) se não assumir nenhuma das características já citadas;

nb(i) é o número de conjuntos motor-bomba da estação elevatória i, nb(0)=0.

Assim, as restrições do problema podem ser formuladas:

1. Fração do intervalo de funcionamento de cada conjunto motor-bomba, que caracteriza a variável de decisão do problema de otimização, é dada por:

$$0 \leq X(i,j,t) \leq 1 \tag{5}$$

2. Capacidade mínima e máxima dos reservatórios, ou seja, o volume armazenado nos reservatórios no instante t devem ser maiores que o

requerimento mínimo (*Vmin(k)*) adotados e menores que sua capacidade máxima (*Vmax(k)*).

$$Vmin(k) \leq V(k,t) \leq Vmax(k) \quad (6)$$

3. O somatório das vazões bombeadas ($\Sigma Qentra(r,t)$) para a Estação de Tratamento de Água *r* no intervalo *t* deve ser menor do que a capacidade máxima de tratamento.

$$\Sigma Qentra(r,t) \leq CETA \quad (7)$$

4. Volume de cada reservatório *k* no início do dia (*Vinicial*(*k*)) é igual ao do final do dia anterior, i.e., *V*(*k*, 24).

$$Vinicial(k) = V(k,24) \quad (8)$$

5. A Equação 4 é responsável pela discretização das vazões transformando o comportamento não linear em linear. Por conseguinte, tem-se o aumento no número de restrições, descritas pela Equação 9. No funcionamento em paralelo dos conjuntos motor-bomba, é necessário que só se ligue o conjunto seguinte quando acionado o anterior em uma mesma estação elevatória.

$$X(i,j,t) \leq X(i,j-1,t) \quad (9)$$

Na aplicação da programação não-linear as Equações 4 e 9 não são utilizadas, sendo substituídas por um algoritmo de determinação da vazão no trecho, descrito abaixo:

[resposta]= Rotina (w(1), w(2),..., w(n), q(1), q(2),..., q(n))
{Colocar o tempo de funcionamento e a vazão ‘’q‘’ de cada conjunto em ordem crescente}
Para f:=1 até n
min: = f
Para g:= f+1 até n

Se (w(g)<a(min))

min:= g

Fim do se

Fim do para

aux:=w(f)

w(f):= w(min)

w(aux): = q(f)

q(f):= q(min)

q(min): = aux

Fim do para

{Calculo da vazão horária no trecho}

h: = n

Resposta: = 0

Para f: = 1 até n

Resposta: = q(h) × w(h) + resposta

h: = h-1

Fim do para

Fim da Rotina

As vazões horárias nas adutoras são caracterizadas pelo funcionamento em paralelo dos conjuntos motor-bomba, que apresentam comportamento não linear. O cálculo da vazão também no modelo não-linear foi determinado segundo as características de medição. Assim com a utilização do algoritmo reduz o número de restrições do problema resolvido por programação não-linear.

4.2 IMPLEMENTAÇÃO DA DESCRIÇÃO MATEMÁTICA

Na aplicação da programação linear utiliza-se a rotina “linprog”, do *toolbox* de otimização do MATLAB. Esta funciona em dois módulos: o de larga escala, com o método de ponto interior primal-dual; e o de média escala, que utiliza o método Simplex. Ainda, a escolha do modulo é automática através do algoritmo “predictor-corrector”.

A aplicação não linear utiliza a rotina “fmincon” do MATLAB, que também possui dois módulos: o de larga escala, com o método de Newton e o módulo de média escala, que utiliza o método de programação quadrática sequencial.

4.3 Métodos Discretos para Análise de Desempenho

Na análise de desempenho do sistema por métodos discretos para as variáveis de decisão foi aplicados as técnicas via Simulação com uma regra padrão (SP) e um método dividido em duas etapas com técnica de programação linear (PL) e linear inteira (PLI).

4.4 Programação Linear e Linear Inteira

Opta-se, aqui, por dividir o processo de otimização em duas etapas, com intervalo de análise horário, para reduzir o número de acionamento dos conjuntos motor-bomba, evitando futuros gastos com manutenção. Na primeira etapa, utiliza-se a programação linear considerando o intervalo de acionamento contínuo, assim garante-se o ótimo global para os intervalos de tempo de acionamento das máquinas e o volume inicial ótimo. A descrição matemática é estabelecida pelas Equações de 4 a 9.

A segunda etapa terá como meta atingir no mínimo o volume ótimo determinado na primeira etapa, mas com as bombas funcionando durante todo o período de tempo definido. Assim, a programação linear inteira é aplicada. Na segunda etapa a função objetivo é:

$$Z = \sum_{i=1}^{ne} \sum_{j=1}^{nb(i)} \sum_{t=1}^{24} \propto (i,j,t).T(t).P(i,j) \tag{10}$$

Sendo *α(i,j,t)* um número binário (0 ou 1) que indica se o conjunto motor-bomba *j* da estação elevatória *i* está ligado (1) ou não (0) durante o intervalo de tempo *t*; assim o acionamento é contínuo.

Além da Equação (7) da capacidade da ETA, têm-se as restrições na segunda etapa, dadas por:

1 O volume armazenado nos reservatórios no instante “*t*” devem ser maiores que o requerimento ótimo determinado na primeira etapa (*Voti(k)*) e menores que sua capacidade máxima (*Vmax(k)*).

2 No funcionamento em paralelo dos conjuntos motor-bomba, que o conjunto seguinte só pode ser acionado depois do anterior em uma mesma adutora.

$$\alpha(i, j, t) \leq \alpha(i, j-1, t)$$

4.5 Simulação com Regra Padrão

Para tentar reproduzir o procedimento operacional normalmente adotado em sistemas de abastecimento de água, um conjunto de regras foi definido por Machado *et. al.* (2005) e Barbosa (2001), cujo fundamento básico é bombear o máximo possível nos períodos fora de ponta, mantendo um nível mínimo ou máximo do reservatório de distribuição e sem desperdícios de água e energia.

As regras de operação são detalhadas na Tabela:

Tabela 1 – Bombeamento em períodos de ponta e fora de ponta.

<table>
<tr><th colspan="2">Nível do tanque receptor</th><th>Tempo que falta para horário de ponta > 2 horas</th><th>Tempo que falta para horário deponta < 2 horas</th><th>Horário de ponta</th></tr>
<tr><td rowspan="2">1º Terço</td><td>Enchendo</td><td>Mantém a programação</td><td rowspan="4">Liga-se uma bomba*</td><td>Mantém aprogramação</td></tr>
<tr><td>Esvaziando</td><td>Liga-se uma bomba</td><td>Liga-se uma bomba*</td></tr>
<tr><td rowspan="2">2º Terço</td><td>Enchendo</td><td rowspan="2">Mantém a programação</td><td rowspan="4">Desliga-se uma bomba**</td></tr>
<tr><td>Esvaziando</td></tr>
<tr><td rowspan="2">3º Terço</td><td>Enchendo</td><td>Desliga-se uma bomba**</td><td>Desliga-se uma bomba**</td></tr>
<tr><td>Esvaziando</td><td>Mantém a programação</td><td>Mantém a programação</td></tr>
</table>

* Escolhe-se a bomba que está a mais tempo inativa
** Escolhe-se a bomba de maior vazão.

4.6 Modelo de Otimização para Reduzir o Número de Acionamento dos Conjuntos Motor-Bomba Via Programação Linear e Programação Quadrática

Com o aumento da demanda e crescente limitação na oferta de energia o objetivo deste trabalho é o de minimizar os custos com energia elétrica, no uso principalmente em sistemas de abastecimento de água. Apresenta-se um modelo de otimização do número de acionamento dos conjuntos motor-bomba utilizados geralmente em sistemas elevatórios, evitando futuros gastos com manutenção. A demanda principal do sistema de abastecimento vem de Reservatórios de Distribuição.

O desenvolvimento da metodologia final, que venha a ser aplicada neste modelo de otimização, venha ter um baixo requerimento de tempo computacional, para se obter uma solução que seja próximo do ótimo global (que geraria valores fracionários).

Dentro deste contexto numa primeira etapa é aplicada a metodologia envolvendo programação linear, com a finalidade de se obter uma solução ótima global. Numa segunda etapa, procura-se, via programação quadrática, aproximar os valores fracionários para números inteiros binários, procurando-se manter os custos obtidos na primeira etapa e satisfazendo as restrições físicas e operacionais do sistema.

Opta-se, aqui, por dividir o processo de otimização em duas etapas, com intervalo de análise horário, para reduzir o número de acionamentos dos conjuntos motor-bomba, evitando futuros gastos com manutenção. Na primeira etapa, utiliza-se a programação linear considerando o intervalo de acionamento contínuo, assim garante-se o ótimo global para os intervalos de tempo de acionamento das máquinas e o volume inicial ótimo.

4.7 Função Objetivo

A função objetivo relativa a minimização do custo de energia tem, como base, a tarifa horária de operação. Dessa forma, representa-se, para um período de 24 horas, o custo energético requerido pelo sistema o qual é dado pela Equação (10). Considerando a reabilitação de sistemas de distribuição de água proposto por Cheung et al. (2003)

Observa-se, portanto, que num processo de minimização dos custos com os gastos com energia, os coeficientes dos primeiros segmentos da função vazão versus número de conjuntos motor-bomba serão ativados primeiro, ou seja, buscar-se-á a maior vazão (e, portanto, maior declividade da reta numa programação linear) pelo menor custo.

Quando o custo de energia é a mesma para todos os motor-bomba, quer estejam ligados isoladamente ou em paralelo com outros, a função objetivo 1, pode não vir a funcionar, ou seja, não consegue 'distinguir' qual deles deve ser ligado primeiro. Como os coeficientes da função objetivo são iguais (apenas custos energéticos) para conjuntos motor-bomba de uma mesma elevatória, esta situação, também, exige que se inclua, entre as restrições, a condição que α(i,j,t) ≥ α(i,j+1,t), ou seja, só ligar o motor-bomba j+1 quando o motor-bomba já estiver ligado. Para forçar a escolha dos que produzem maior vazão como sendo os primeiros a serem ligados, deve-se dar preferência àqueles cujo custo por unidade de vazão seja menor (pode, também, ser conseguido via a atribuição de um peso), ou seja:

$$\min Z = \sum_{i=1}^{ne} \sum_{j=1}^{nb(i)} \sum_{t=1}^{24} \propto (i,j,t).\varpi^{j-1}.\frac{T(t).P(i,j)}{\Delta Q(i,j)} \qquad (11)$$

Sendo:

ω^{j-1}- o valor constante (peso, ex: 10^{j-1}) atribuído à escolha do j-ézimo motorbomba;

Δ*Q*(*i*, *j*) – acréscimo de vazão da colocação do *j-ézimo* conjunto motorbomba em paralelo na estação elevatória *i*;

$\frac{T(t).P(i,j)}{\Delta Q(i,j)}$ - custo de energia por unidade de vazão do *j-ézimo* conjunto motorbomba em paralelo na estação elevatória *i* no instante *t*.

4.8 Os Modelos de Otimização Utilizados

1ª Etapa

Levando em consideração as ponderações sobre a função objetivo e as variáveis de decisão, poder-se-á usar uma simples programação linear, numa

primeira etapa, como ponto de partida para se determinar o ponto de operação ótimo. Isso porque o resultado obtido via programação linear, reproduzem o que seria um ótimo global. O problema, a ser resolvido numa segunda etapa, está em se determinar uma metodologia para transformar os parâmetros α(ijt) que são fracionários em valores binários 0 ou 1, que significa, fisicamente, que o sistema motor-bomba estar desligado ou ligado, respectivamente. Portanto, na primeira etapa o problema pode ser formulado da seguinte forma:

$$Z = \sum_{j=1}^{4}\sum_{t=1}^{24}\left[\frac{T(t).E(1,j)}{\Delta Q(1,j)}.10^{j-1}\right].\propto\ (1,j,t) + \sum_{j=1}^{4}\sum_{t=1}^{24}\left[\frac{T(t).E(2,j)}{\Delta Q(2,j)}.10^{j-1}\right].\alpha(2,j,t) + \quad (12)$$

$$+\sum_{j=1}^{24}\left[\frac{T(t).E(3,1)}{\Delta\ Q(1,j)}.10^{0}\right].\propto(1,j,t) + \sum_{j=1}^{3}\sum_{t=1}^{24}\left[\frac{T(t).E(4,j)}{\Delta\ Q(4,j)}.10^{j-1}\right].\propto(4,j,t) + \quad (13)$$

$$+\sum_{j=1}^{4}\sum_{t=1}^{24}\left[\frac{T(t).E(5,j)}{\Delta\ Q(5,j)}.10^{j-1}\right].\propto(5,j,t) + \sum_{j=1}^{5}\sum_{t=1}^{24}\left[\frac{T(t).E(6,j)}{\Delta\ Q(6,j)}.10^{j-1}\right].\alpha(6,j,t) \quad (14)$$

Restrições quanto a limitações operacionais volumétricas para os reservatórios:

$$V_R^{min} \leq V_R(t) \leq V_R^{max}; \forall t \quad (15)$$

Sendo V_R o volume do reservatório *i* no instante *t*.

Restrições de limites quanto ao número de bombas que trabalham em cada estação (neste caso foi usado o número máximo de motores-bomba em cada estação elevatória menos um, que poderá estar em manutenção, exceto para a equação, que só tem uma bomba e não entra nestas restrições):

2ª Etapa:

A metodologia usada neste trabalho para tentar fazer com que os α(i,j,t) fracionários venham a convergir para os valores binários 0 ou 1, de forma a se minimizar o número de liga-desligas, é baseada na programação quadrática. No entanto, durante este processo, procurar-se-á alcançar uma situação operacional que chegue o mais próximo do custo ótimo global obtido via PL.

Portanto, depois de obtido um resultado via programação linear, que fornece um dos valores ótimos globais (o problema ter infinitos pontos ótimos de operação e apresentar vários α(i,j,t) fracionários, quer sejam no horário de ponta ou no horário fora de ponta), para a minimização do custo energético, reformula-se o problema da seguinte forma:

Tem-se como variáveis de decisão somente os α(i,j,t) fracionários (além disso, tem-se que conhecer os valores de seus imediatos antecessores e sucessores no tempo, quer sejam iguais a zero ou um para ter a possibilidade de manter-se a bomba subseqüente em um estado de ‘ligado’ ou ‘desligado

A nova função objetivo, de natureza quadrática, que visa minimizar o número de liga-desligas e transformar os α(i,j,t) fracionários iguais a 0 ou 1, é dada por:

$$\mathbf{max}\, fo = \sum_k \sum_l \sum_t \propto (k,l,t) + \sum_i \sum_j \sum_t \propto (i,j,t) \propto (i,j,t+1) \qquad (16)$$

Para $\forall ijt \;\vdots\; 0 < \propto (i,j,t) < 1 \; e \;\; \propto (k,l,t) \in \coprod$ (17)

Sendo $\coprod$ o subespaço das variáveis de decisão onde ∝(k,l,t-1)=1 ou ∝(k,l,t+1)=1, ou seja, seu sucessor ou antecessor no tempo que não é uma variável de decisão para este problema, seja um número inteiro e igual a 1.

Para se ter uma idéia de como funciona o termo quadrático deste processo, toma-se como exemplo um problema que tenha, como resultado da PL, os valores α(i,j,1)=0,5 , α(i,j,2)=0,7 e α(i,j,3)=0,8 (resultando numa fo=0,91). Observe que o máximo número de horas para uma combinação de valores dos α(i,j,t) fracionários é igual a 2 (soma), caso contrário aumenta-se o número de horas em

que o sistema está ligado e, consequentemente, o valor do gasto com energia. Portanto, os prováveis resultados, que maximizam a função objetivo fo acima, serão dados na forma seqüencial dos α(i,j,t), a não ser por limitações físicas dos reservatórios ou outros componentes físicos, pois qualquer outra combinação gerará uma fo menor que 1, ou seja, α(i,j,1)=1,0 , α(i,j,2)=1,0 e α(i,j,3)=0,0 com a fo=1 ou α(i,j,1)=0,0 , α(i,j,2)=1,0 e α(i,j,3)=1,0 com a fo=1.

O termo linear da função objetivo tem a função de vincular ao estabelecimento de um sistema motor-bomba, que não é variável de decisão, ligado (Γ ∈) , (t l k α) a ligação do mesmo sistema motor-bomba num tempo anterior ou posterior, evitando-se mais uma operação de liga-desliga. Para ilustrar tal comportamento, tendo-se como base Tabela (02) (FIRMINO et al., 2006), onde apresenta os resultados oriundos da aplicação da primeira etapa, para uma estação elevatória.

Observa-se nessa tabela que a soma dos valores fracionários do sistema motor-bomba j=1 no período fora de ponta é igual a 1,6 horas (α(i,j,8)=0,3, α(i,j,9)=0,2, α(i,j,14)=0,4 e α(i,j,15)=0,5). A soma dos valores fracionários do sistema motor-bomba j=2, no período considerado como fora de ponta, é igual a 3,6 horas (α(i,j,1)=0,2, α(i,j,2)=0,3, α(i,j,4)=0,3, α(i,j,5)=0,5, α(i,j,7)=0,4, α(i,j,10)=0,3, α(i,j,11)=0,5, α(i,j,12)=0,6, α(i,j,13)=0,1, α(i,j,24)=0,4) .

A soma dos valores fracionários do sistema motor-bomba j=1 no horário de ponta é igual a 0,9 horas (α(i,j,18)=0,4, α(i,j,19)=0,5, α(i,j,21)=0,2). Com isso, para manter o custo de energia elétrica, obtido na primeira fase, se faz necessário impor as seguintes restrições ao problema, nesta segunda fase:

$$\alpha(i,j,8)+\alpha(i,j,9)+\alpha(i,j,14)+\alpha(i,j,15)\leq 1{,}6 \text{ para } i=I \text{ e } j=1$$

$$\alpha(i,j,1)+\alpha(i,j,2)+\alpha(i,j,4)+\alpha(i,j,5)+\alpha(i,j,7)+\alpha(i,j,10)+\alpha(1,j,11)+\alpha(i,j,12)+\alpha(i,j,13)$$
$$+\alpha(i,j,24)\leq 3{,}6 \text{ para } i=I \text{ e } j=2$$

$$\alpha(i,j,18)+\alpha(i,j,19)+\alpha(i,j,21)\leq 0{,}9 \text{ para } I=1 \text{ e } j=1$$

Resultado da primeira etapa de funcionamento de 2 conjuntos motor-bomba para um problema qualquer.

Tabela 2 – Resultado do funcionamento de bombeamento fora de ponta

Elevatória	Bomba	Tempo de Funcionamento (minutos)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Fora de Ponta											
I	1	1	1	1	1	1	1	0,3	0,2	1	1	1	1
I	2	0,2	0,3	0	0,3	0,5	1	0,4	0	0	0,3	0,5	0,6

Resultado da primeira etapa para o funcionamento de 2 conjuntos motor-bomba para um problema qualquer.

Tabela 3 – Resultado do funcionamento de bombeamento em ponta e fora de ponta

Elevatória	Bomba	Tempo de Funcionamento (minutos)											
		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
		Fora de Ponta				Ponta				Fora de Ponta			
I	1	1	0,4	0,5	1	1	0,4	0,5	1	0,2	1	1	1
I	2	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4

Com relação aos elementos da função objetivo relativos aos antecessores ou sucessores às variáveis de decisão fracionárias temos que:

Os *α(i,j,t)* constantes e iguais a 0 ou 1, antecessores ou sucessores às variáveis de decisão com números fracionários, segundo os resultados da 1ª Etapa, deveriam ser variáveis de decisão na programação quadrática e entrar na função objetivo para permitir ver se o antecessor ou sucessor está ligado ou desligado para ligar ou desligar o *α(i,j,t)* fracionário e minimizar o número de liga-desligas;

Para evitar incluir os *α(i,j,t)* inteiros antecessores e sucessores como variáveis de decisão (pois já se sabe os seus valores), leva-se em consideração o seu valor na hora de se estabelecer a função objetivo da seguinte forma: se o antecessor *α(i,j,t)* =1, adicionar *α(i,j,t).α(i,j,t+1)= α(i,j,t+1)* na função objetivo, caso contrário (*α(i,j,t) =0*) o termo *α(i,j,t).α(i,j,t+1)=0,* ou seja, não se adiciona nada, e a mesma regra se aplicará ao sucessor de uma variável de decisão fracionária obtida como solução na 1ª Etapa.

Assim inclui-se na função objetivo, para este problema, a seguinte soma:

maxfo= α(1,1,8)+ α(1,1,9)+ α(1,1,14)+ α(1,1,15)+ α(1,1,18)+ α(1,1,19) + α(1,1,21)+ (17)

$$\alpha(1,1,21) + \alpha(1,2,5) + \alpha(1,2,7) + \sum_i \sum_j \sum_t \alpha i,j,t\ \alpha ij,t + 1 \textit{para} \forall ijt | 0 < \alpha ijt < 1 \quad (18)$$

Observe que este tipo de programação quadrática tem um número bem reduzido de variáveis de decisão e apresenta restrições lineares, portanto, espera-se que o processo de convergência para um (de vários possíveis) ótimo (global) seja bem rápido.

Têm-se como restrições operacionais:

- As limitações das variáveis de decisão *α(i,j,t)* (0 ou 1)
- Os balanços hídricos e capacidades operacionais dos componentes hidráulicos, que se mantêm (observe que os balanços hídricos vão ter que considerar como constantes as vazões oriundas de conjuntos motor-bomba considerados ligados na 1ª Etapa),
- Para se ter o mesmo número de horas ligado, para cada sistema motor-bomba, em horário de ponta (e fora de ponta), tem-se que incluir que a soma dos *α(i,j,t)* no horário de ponta (e fora de ponta) como sendo igual a soma de seus valores obtidos via PL. Esta restrição manterá o custo energético ótimo obtido na PL.

Se desejar que não se tenha número fracionário para funcionamento dos sistemas motor-bomba, basta aproximar a soma dos *α(i,j,t)* fracionários para um número inteiro imediatamente superior e relaxar, principalmente, as restrições volumétricas (que podem forçar a geração de números fracionários).

5 CONCLUSÃO

5.1 Resultados e Comparações

Um dos primeiros benefícios da arquitetura proposta a ser levado em consideração é a redução de cabos de interligação e de hardware, permitindo que se adquira somente o necessário para iniciar a operação. Os instrumentos passam a ter uma maior importância dentro do processo, pois a partir de sua automação passa a executar autodiagnostico, processamento e atuação direta no sistema.

Outras vantagens da automatização do processo em relação ao sistema manual são:

- Melhor tempo de resposta a tomada de decisão
- Redundância da informação
- Melhoria na qualidade
- Redução de custo por dosagem excessiva.

Os sistemas em rede também são vantajosos, pois podem ser totalmente configurados pelo operador local. Este não precisa conhecer linguagem de programação para operar ou configurar o sistema, pois essas ações são realizadas por meio de uma interface gráfica apropriada. Porém, durante a configuração, deve-se distribuiras tarefas de um modo racional para não sobrecarregar a rede de campo, deixando as funções críticas e demais funções a cargo do servidor.

Em sistemas de automação tradicional, o volume de informações disponíveis ao usuário normalmente não ultrapassa o volume das informações de controle. Nos sistemas fieldbus, por exemplo, o volume de informações no controle e o nível de gerenciamento é bem maior, devido as facilidades atribuídas principalmente a comunicação digital entre os equipamentos. Os sistemas de distribuição de água necessitam obter todas as informações pertinentes, pois é uma operação complexa em que os operadores devem tomar decisões fundamentais, gerar relatórios confiáveis e fornecer dados operacionais para a gerência conforme demonstrado no capítulo 5 sobre algoritmo de verificação.

5.1.1 Conclusões do Estudo de Casos

Na avaliação da utilização de diferentes modelos, PL e PNL que geram soluções com valores fracionários, foi verificado que:

- A programação linear requer o menor tempo de processamento quando comparado a programação não linear e dispensa a atribuição de um valor inicial para as variáveis de iteração;

- A programação linear é mais eficiente que a não linear,já que a função objetivo é linear;

- A programação não linear e sensível à escolha dos valores iniciais das variáveis de decisão;

- Na programação não linear o valor inicial atribuído às variáveis de decisão pode aumentar o tempo de processamento em mais de 100 vezes;

- A linearização de funções em problemas dessa categoria é viável. Vale ressaltar, no entanto, para uma possível aplicação de função multiobjectivo para problemas mal condicionados, com variáveis discretas ou funções descontínua.

5.2 Proposições para Estudos Futuros

Como possibilidade de aprofundamento e futuros desdobramentos deste trabalho destacam-se:

- Incluir estudo com previsão de demanda a partir de grandes históricos para um melhor resultado das análises.
- pesquisa sobre sensores sem fio para melhorar a gestão no monitoramento da captação

- pesquisa sobre instrumentos inteligentes para melhorar definição dos instrumentos que compõem um sistema de abastecimento de água, visando o tratamento e distribuição interligadas as variáveis de controle
- implementação da proposta deste trabalho de pesquisa em uma instalação de abastecimento de água para avaliar o comportamento em período de teste
- aprofundamento dos sistemas supervisórios SCADA existentes
- estudo de interferências e inclusão de novos protocolos de comunicação entre estações remotas e CCOs
- fazer um re-estudo do problema utilizando modelagem que incorpore outras funções custo-benefício (multiobjetivo), na operação e manutenção dos sistemas.
- estudar e aplicar técnicas de otimização na minimização do uso de energia elétrica pelo sistema quando da introdução de inversores de freqüência, como ferramentas de controle de vazões no bombeamento das estações elevatórias.

5.3 Considerações Finais

A pesquisa que serviu para elaboração deste trabalho foi desenvolvida no período de 2009 a novembro de 2011, no Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina.

Foi necessário realizar uma ampla pesquisa sobre os atuais sistemas tecnológicos, incluindo instrumentação de campo, interface de comunicação, protocolos e sistemas de redes para automação, supervisórios, SCADA, softwares de simulação como EPANET. Foi realizada a comparação de protocolos proprietários, assim como protocolos abertos e redes. Desta análise foi constado que é possível utilizar com segurança nos sistemas de gestão e controle do abastecimento de água softwares aberto com níveis de segurança diferenciado e utilização de linhas privativas, integrados com os demais níveis de automação.

A partir do estudo dos sistemas de abastecimento de água foi elaborada uma proposta para padronização de futuras instalações seguindo as

normas da SANEPAR (Companhia de Saneamento Básico do Paraná), o que vem de encontro com os recentes anúncios que a empresa deve aumentar sua atuação junto aos municípios para que possam administrar os SAAE (Serviço Autônomo de Agua e Esgoto).

A constatação é que muitas empresas de saneamento operam o tratamento e distribuição de água com automação parcial ou até mesmo de forma manual, dificultando a gestão eficiente e rigorosa, impactando diretamente no custo final para o consumidor.

Referente a otimização do uso de energia elétrica foi realizado uma comparação e elaborado um estudo de caso para comparar a atuação de operação manual em previsão com um sistema de controle automático que visa melhorar a eficiência energética.

O sistema de acionamento de bombas atualmente implementado no CCO de Londrina/Cambé é realizado por um operador que tem experiência para determinar o nível do reservatório necessário, ou seja, uma previsão de consumo, a partir daí é realizado o abastecimento.

Com um algoritmo para previsão de demanda seria possível controlar melhor o tempo de acionamento dos conjuntos motobombas e a quantidade de vezes que estes são acionados tanto no horário de ponta de consumo como no horário fora de ponta.

Este trabalho precisa ser testado em uma planta física para verificar a real funcionalidade da programação linear e não linear. Espera contribuir para que a água seja disponibilizada e utilizada de forma que minimize seus custosde produção e distribuição. Espera-se ainda, abrir novas frentes de pesquisa interdisciplinares na disciplina automação dos sistemas de saneamento.

REFERÊNCIAS

ALPEROVITS, E.;SHAMIR, U. Design of optimal water distribution systems. **Water Resources Research**, New York, v. 13, n. 6, p. 885-900,1977.

ANATEL. **Manual de projetos técnicos (SITAR)**. Disponível em: <http://www.anatel.gov.br/portal/exibirportalredireciona.do?camilhorel=Empresa&codigodocumento=60402>. Acesso em: 05 jan 2011.

ANDERSON, Y; YONG B, Studahl. Waterborne campylobacter in sweden: the cost of an outbreak. **Wat Sci. Tech**, GreatBritain, v. 35, n 11-14, 1997.

ANDRADE, A. A. **Emprego de sistemas especialistas em sistemas supervisórios de automação industrial**. 2001. Dissertação (Mestrado) – EPUSP, São Paulo, 2001.

BAO, Y.;MAYS, L. W. Model for water distribution system reliability. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.116, n. 9, p.1119-1137, 2000.

BAPTISTA, J. M. Como melhorar a qualidade em sistemas de abastecimento de água. In: CONGRESSO DA ÁGUA,4., 1998, Lisboa. **Anais eletrônicos...** 1998. Disponível em: <www.aprh.pt/congressoagua98>Acesso em: 11 de jan. 2011.

BARBOSA, J. **Simulação da operação de bombas em sistemas de abastecimento de água**. 2009. 110 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

BERGE, J. **Fieldbuses for process controle**: engineering, operation, maintenance. Carolina do Norte: The Instrumentatation, Systems, and Automation Society, 1998.

BRANDÃO, B. L. J. **Modelo para operação de sistema de reservatório com usos múltiplos**. 2003. Tese (Doutorado) – EPUSP, São Paulo, 2003.

BRION, L.;MAYS, L. W. Methodology for optimal operation of pumping stations in water distribution systems.journal of hydraulic engineering. **ASCE**, New York, v.117, n. 11, p. 1551-1569, 1991.

CARMO, C. M. ;TÁVORA JR, J. L. Avaliação da eficiência técnica das empresas de saneamento brasileira utilizando a metologia DEA. In: ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA, 31., 2003, Porto Seguro, **Anais...** Porto Seguro, 2003.

CELESTE, A. B.; SUZUKI, K.; KADOTA, A. An optimization mode for the operation of a water resource using quadratic programming annual journal of hydraulic engineering. **JSCE**, Japan, v. 4. p. 373-378. 2004.

CERRI, M. L. **Enterprise resource planning**: um estudo sobre estratégias de implantação.2004. 22-28 f. Dissertação (Mestrado) – EPUSP, São Paulo, 2004.

CHEUNG, P.B.; REIS, L.F.R.; CORRIJO, I.B. Multiobjective optimization to the rehabilitation of a water distribution network. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING AND CONTROL FOR THE WATER INDUSTRY. 3., 2003, Londres. **Conference…** sep. 2003, p.318-328.

CLINGENPEEL, W. H. Optimizing pump operating cost. **Journal of American Water Works Association**, v. 75, n. 10, p. 502-509, 1963.

COELHO, M. S.; LOBUE F. S. **Apostila de sistemas digitais de controle**. São Paulo: SENAI, 2006.

CORRIJO, I. B. **Otimização de redes de distribuição de água com expansão**: aplicação à cidade de Goiânia. 2009. 239 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

COULBECK, B.; ORR, C. Real-time optimized control of water distribution system. Optimizing the resource for water management. **ASCE**, p. 248-251, 1990.

EBATA, Y. Development of the Intranet based SCADA (supervisory control and data acquisition system) for power system. In: POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER, Tokyo, 2000. **Conference…** Tokyo: IEEE, 2000, p. 23-27.

FILHO, Mario. Automação no saneamento básico: diferentes necessidades para um mesmo objetivo. **Controle & Instrumentação**, São Paulo, n. 61, 2001.

HOUAISS. **Dicionário online**. Disponível em: <http://houaiss.uol.com.br/>. Acesso em: 06 mar. 2008.

KADAR; BAMUDIM. Pipeline network modeling and simulation for intelligent monitoring and control: a case study of a municipal water supply system.**Ind. Eng. Chem. Res**, v. 37, p.1033-1044. 2001.

KLEMPOUS, R.; KOTOWSKI, J.; NIKODEN, J.; ULASIEDWIEZ, J. Optimization algorithms of operative control in water distribution systems. **Journal**, v. 8, n. 2, p. 149 – 172, 1997.

MACHADO, E. C. M. N.;SANTANA, C. W. S.;BRASILEIRO, E. V.;GALVÃO, C. O.; BRASILEIRO, F. V. Otimização da operação de redes de adução de água utilizando algoritmos genéticos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15., 2005, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa, 2005.

MASCARENHAS, F. J. A infra-estrutura no Brasil. In: CONSELHO DE INFRAESTRUTURA, 2005, Brasília. **Conselho...** Brasília, 2005.

MELO BAPTISTA, J.;MATOS, M. R. “**O saneamento básico em Portugal**”. Lisboa: LNEC, 1995. (Série Gestão de Sistemas de Saneamento Básico, v. 1)

MOLLENKAMP, R. A. **Controle automático de processos**. São Paulo: Ebras, 1995.

PIOVERSAN, A. S. **Instrumentação inteligente**: a implementação de malhas de controle no nível dos instrumentos de processo.1993, Dissertação (Mestrado) – EPUSP, São Paulo,1993.

PEREIRA, S. L. SOUZA, M. Instrumentação inteligente empregada na gestão de sistemas de tratamento de água e análise de benefícios e vantagens. **Controle e Instrumentação**, São Paulo, ano 10, n. 117, 2006.

PETTERSON, R. **Visuals for information**: researchandpractice. Califórnia: Educational Technology Publications, 1989.

SANEPAR. **Site da companhia de saneamento básico do estado do Paraná**. Disponível em: <http://www.sanepar.com.br>. Acesso em: 08 jan. 2011.

SILVEIRA, P.R ;SANTOS, W.E. **Automação e controle discreto**. São Paulo: Érica 1998

SVERZUT, J.U. **Redes GSM, gPRS, EDGE e UMTS:** evolução a caminho da terceira geração (3G). São Paulo: Érica, 2005.

TROJAN, F.;MARÇAL, R.;RESENDE, L.M.;STLADER, C.C. Automação em sistema urbano de abastecimento de água: uma ferramenta para redução de perdas de produção. In: ENCONTRO ESTADUAL DE ENGENHARIA DA PRODUÇÃO E I SIMPÓSIO DE GESTÃO INDUSTRIAL,1., 2000, Ponta Grossa. **Anais...** Ponta Grossa, 2000.

USEPA. **Agência de proteção ambiental dos EUA; “apêndice a**: medidas deconservação de água. guia de planos para conservação de água tratada”. Washington: D.C, ago. 1998.

ANEXOS

ANEXO A – Artigo Submetido e Aceito

BORGES, A. W. S.; COVACIC, M. R. .Optimizing the operation of pumping system with linear programming (LP), nonlinear (PNL) and genetic algorithm (GA). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CHEMICAL, MATERIAL AND METALLURGICAL ENGINEERING (ICCMME), 2011, Hong Kong. **Conference…** Hong Kong, 2011.